

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZI ENDÜSTRİYEL VE MADENSEL ATIKLARIN GAZ BETON ÜRETİMİNDE
KULLANIM OLANAKLARININ BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

NİLGÜN KIZILKAYA

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Didem EREN SARICI

TEMMUZ-2021

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZI ENDÜSTRİYEL VE MADENSEL ATIKLARIN GAZ BETON ÜRETİMİNDE
KULLANIM OLANAKLARININ BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**NİLGÜN KIZILKAYA
(D3614160401)**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Didem EREN SARICI

TEMMUZ-2021

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasın da yardım, bilgi, öneri, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç.Dr. Didem EREN SARICI'ya,

Tez izleme jüri üyelerim emekli Prof.Dr. Mehmet ÖNAL, Prof.Dr. Hikmet SİS, Doç.Dr. Tacettin GEÇKİL'e,

Çalışmalarım da ayrıca hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmam süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme; öneri, eleştirileri ve yardımlarıyla her konuda yanımda olan hocalarıma ve arkadaşlarıma,

Çalışmayı 2018/FDK-1133 nolu proje ile maddi ve manevi destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon (BAP) Birimi'ne;

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum ‘Bazı Endüstriyel ve Madensel Atıkların Gaz Beton Üretiminde Kullanım Olanaklarının Belirlenmesi’ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Nilgün KIZILKAYA



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Tezin Kapsamı	3
2. KURAMSAL TEMELLER	7
2.1 Hafif Beton ve Sınıflandırılması.....	7
2.2 Gaz Beton	10
2.3 Gaz Betonun Özellikleri	12
2.3.1 Gaz betonun kimyasal ve mineralojik özellikleri	12
2.3.1.1 X-ışını kırınım yöntemi (XRD)	13
2.3.1.2 X-ışınları floresans spektrometresi (XRF)	14
2.3.1.3 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	15
2.3.2 Gaz betonun fiziksel özellikleri	16
2.3.2.1 Birim hacim ağırlık (Yoğunluk)	18
2.3.2.2 Porozite	18
2.3.2.3 Su emme	19
2.3.2.4 Kapiler (kılcal) su emme	19
2.3.2.5 Nem içeriği	20
2.3.3 Gaz betonun mekanik özellikleri	20
2.3.3.1 Basınç dayanımı	20
2.3.3.2 Ultrasonik dalga hızı.....	21
2.3.4 Termik özellikler	22
2.3.4.1 Isıl iletkenlik.....	22
2.4 Gaz Beton Sınıflandırması ve Türleri.....	23
2.5 Gaz Beton Ham Maddeleri	24
2.6 Gaz Beton Üretimi.....	30
2.7 Gaz Beton Üretiminde Atıkların Kullanımı	32
2.8 İstatistiksel Yöntemler	37
2.8.1 Korelasyon.....	37
2.8.2 Yapay sinir ağları.....	38
2.9 Literatür Özetleri	45
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	58
3.1 Malzeme	58
3.1.1 Atıklar	61
3.1.2 Kuvarsit	70
3.1.3 Çimento	73
3.1.4 Alçı taşı.....	75
3.1.5 Kireç	78
3.1.6 Alüminyum tozu	81
3.1.7 Su	82

3.2 Yöntem.....	82
3.2.1 Gaz beton üretimi	83
3.2.2 Gaz beton örneklerinin kimyasal-mineralojik özellikleri.....	87
3.2.2.1 Elementel analiz (XRF)	87
3.2.2.2 X-ışını kırınımı analizleri (XRD)	87
3.2.2.3 Taramalı elektron mikroskobu analizleri (SEM).....	88
3.2.3 Gaz beton örneklerinin fiziksel-mekanik özelliklerin belirlenmesi	88
3.2.3.1 Tane boyut dağılımı.....	88
3.2.3.2 Özgül ağırlık tayini.....	89
3.2.3.3 Birim hacim ağırlık.....	90
3.2.3.4 Porozite tayini.....	90
3.2.3.5 Su emme deneyi.....	91
3.2.3.6 Kapiler (kılcal) su emme tayini	92
3.2.3.7 Nem içeriğinin belirlenmesi	93
3.2.3.8 Basınç dayanımı	94
3.2.3.9 Ultrasonik dalga hızı deneyi	95
3.2.4 Termik özelliklerin belirlenmesi	97
3.2.4.1 Isıl iletkenlik deneyi	97
3.2.5 İstatistiksel yöntemler.....	98
3.2.5.1 Korelasyon analizi	98
3.2.5.2 Yapay sinir ağları analizi.....	99
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	100
4.1 Kimyasal-Mineralojik Bulgular	100
4.1.1 Elementel analiz (XRF) sonuçları	100
4.1.2 X-ışını kırınımı analizleri (XRD) sonuçları	100
4.1.3 Taramalı elektron mikroskobu analiz (SEM) sonuçları	103
4.2 Fiziksel-Mekanik Bulgular.....	108
4.2.1 Birim hacim ağırlık deney sonuçları	108
4.2.2 Porozite deney sonuçları	113
4.2.3 Su emme deney sonuçları.....	117
4.2.4 Kapiler (kılcal) su emme deney sonuçları.....	121
4.2.5 Nem içeriği deney sonuçları.....	127
4.2.6 Basınç dayanımı deney sonuçları.....	132
4.2.7 Ultrasonik dalga hızı deney sonuçları	137
4.3 Termik Bulgular	142
4.3.1 Isıl iletkenlik deney sonuçları	142
4.4 İstatistiksel Bulgular.....	146
4.4.1 Korelasyon analiz sonuçları	146
4.4.2 Yapay sinir ağları analiz sonuçları	148
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	153
KAYNAKLAR.....	157
ÖZGEÇMİŞ	168

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Hafif beton sınıfları.....	8
Çizelge 2.2 : Hafif agregalarla yapılmış betonların basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları	9
Çizelge 2.3 : Gaz betonun çeşitli birim hacim ağırlıkları için porozite değerleri.....	19
Çizelge 2.4 : Gaz betonun özellikleri.....	21
Çizelge 2.5 : Kuru gaz betonun ısı iletkenlik değerleri.....	23
Çizelge 3.1 : Gaz beton üretiminde kullanılan cam atığının kimyasal bileşimi.....	62
Çizelge 3.2 : Cam atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.. ..	64
Çizelge 3.3 : Gaz beton üretiminde kullanılan mermer atığının kimyasal bileşimi.....	64
Çizelge 3.4 : Mermer atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.....	66
Çizelge 3.5 : Gaz beton üretiminde kullanılan seramik atığının kimyasal bileşimi.....	66
Çizelge 3.6 : Seramik atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.....	68
Çizelge 3.7 : Gaz beton üretiminde kullanılan granit atığının kimyasal bileşimi.....	68
Çizelge 3.8 : Granit atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.....	70
Çizelge 3.9 : Gaz beton üretiminde kullanılan kuvarsitin kimyasal bileşimi.	72
Çizelge 3.10 : Kuvarsite ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.	73
Çizelge 3.11 : Çimontaya ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.. ..	75
Çizelge 3.12 : Gaz beton üretiminde kullanılan alçı taşının kimyasal bileşimi.....	76
Çizelge 3.13 : Alçı taşı ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.. ..	78
Çizelge 3.14 : Gaz beton üretiminde kullanılan kirecin kimyasal bileşimi.	79
Çizelge 3.15 : Kirece ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.. ..	81
Çizelge 3.16 : Deneyde kullanılan malzeme ve 1 m ³ gaz beton karışım oranları.....	84
Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan atıklar ve kodları.. ..	100
Çizelge 4.2 : Kontrol gaz beton numunesinin (A) kimyasal bileşimi.....	100
Çizelge 4.3 : Cam atıklı örneklerin birim hacim ağırlığı değerleri.. ..	108
Çizelge 4.4 : Mermer atıklı örneklerin birim hacim ağırlığı değerleri.....	109
Çizelge 4.5 : Seramik atıklı örneklerin birim hacim ağırlığı değerleri.. ..	110
Çizelge 4.6 : Granit atıklı örneklerin birim hacim ağırlığı değerleri.. ..	111
Çizelge 4.7 : Cam atıklı örneklerin porozite değerleri.....	114
Çizelge 4.8 : Mermer atıklı örneklerin porozite değerleri.....	114
Çizelge 4.9 : Seramik atıklı örneklerin porozite değerleri	115
Çizelge 4.10 : Granit atıklı örneklerin porozite değerleri	115
Çizelge 4.11 : Cam atıklı örneklerin su emme değerleri.....	118
Çizelge 4.12 : Mermer atıklı örneklerin su emme değerleri	118
Çizelge 4.13 : Seramik atıklı örneklerin su emme değerleri.....	119
Çizelge 4.14 : Granit atıklı örneklerin su emme değerleri.....	119
Çizelge 4.15 : Cam atıklı örneklerin kapiler su emme değerleri.....	122
Çizelge 4.16 : Mermer atıklı örneklerin kapiler su emme değerleri.. ..	122
Çizelge 4.17 : Seramik atıklı örneklerin kapiler su emme değerleri.....	123
Çizelge 4.18 : Granit atıklı örneklerin kapiler su emme değerleri.....	123
Çizelge 4.19 : Cam atıklı örneklerin nem içeriği değerleri.....	127
Çizelge 4.20 : Mermer atıklı örneklerin nem içeriği değerleri.....	128
Çizelge 4.21 : Seramik atıklı örneklerin nem içeriği değerleri.....	129
Çizelge 4.22 : Granit atıklı örneklerin nem içeriği değerleri.. ..	130
Çizelge 4.23 : Cam atıklı örneklerin basınç dayanımı değerleri.....	133
Çizelge 4.24 : Mermer atıklı örneklerin basınç dayanımı değerleri.....	133
Çizelge 4.25 : Seramik atıklı örneklerin basınç dayanımı değerleri.....	134

Çizelge 4.26 : Granit atıklı örneklerin basınç dayanımı değerleri.	135
Çizelge 4.27 : Cam atıklı örneklerin ultrasonik dalga hızı değerleri..	137
Çizelge 4.28 : Mermer atıklı örneklerin ultrasonik dalga hızı değerleri.	138
Çizelge 4.29 : Seramik atıklı örneklerin ultrasonik dalga hızı değerleri.....	139
Çizelge 4.30 : Granit atıklı örneklerin ultrasonik dalga hızı değerleri.....	140
Çizelge 4.31 : Cam atıklı örneklerin ısı iletkenlik değerleri.....	143
Çizelge 4.32 : Mermer atıklı örneklerin ısı iletkenlik değerleri.....	143
Çizelge 4.33 : Seramik atıklı örneklerin ısı iletkenlik değerleri..	144
Çizelge 4.34 : Granit atıklı örneklerin ısı iletkenlik değerleri..	144
Çizelge 4.35 : Pearson korelasyon katsayısının yorumu.....	147
Çizelge 4.36 : Pearson korelasyon analizi sonuçları.....	147
Çizelge 4.37 : YSA modellerinin tahmin performansları... ..	149
Çizelge 4.38 : Gerçek değerler, tahmin değerleri ve elde edilen hatalar..	151
Çizelge 4.39 : En iyi performansa sahip modelin ağ parametreleri.	152



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Hafif betonların birim hacim ağırlıkları ve dayanımlarına göre sınıflandırılması.....	8
Şekil 2.2 : Gaz betonun bünyesinde bulunan hava kabarcıklarının görünümü.....	11
Şekil 2.3 : Ticari gaz betona ait görüntü..	12
Şekil 2.4 : Bragg yasasının gösterimi.....	14
Şekil 2.5 : Gaz beton ürünlerinin yapıda kullanımı... ..	24
Şekil 2.6 : Gaz beton üretiminde kullanılan kuvarsit.....	26
Şekil 2.7 : Gaz beton üretiminde kullanılan çimento.....	27
Şekil 2.8 : Gaz beton üretiminde kullanılan alçı taşı.	28
Şekil 2.9 : Gaz beton üretiminde kullanılan kireç.....	29
Şekil 2.10 : Gaz beton üretiminde kullanılan alüminyum tozu.....	29
Şekil 2.11 : Gaz beton üretim şeması.....	32
Şekil 2.12 : Gaz beton üretimde kullanılan cam atıklar..	34
Şekil 2.13 : Gaz beton üretimde kullanılan mermer atıklar..	35
Şekil 2.14 : Gaz beton üretimde kullanılan seramik atıklar.....	36
Şekil 2.15 : Gaz beton üretimde kullanılan granit atıklar....	37
Şekil 2.16 : Yapay sinir hücresinin yapısı.....	43
Şekil 2.17 : Bir yapay sinir ağı örneği.....	43
Şekil 3.1 : Gaz beton üretiminde kullanılan çeneli kırıcı (a), merdaneli kırıcı (b), bilyalı değirmenlere (c, d) ait görüntü..	59
Şekil 3.2 : Eleme cihazına ait görüntü..	60
Şekil 3.3 : Gaz beton üretiminde kullanılan etüv (a), otoklav (b), mikser (c), beton kalıplarına (d) ait görüntü.....	61
Şekil 3.4 : Gaz beton üretiminde kullanılan atıkların görüntüsü..	62
Şekil 3.5 : Cam atığına ait X-ışınları difraktogramı.....	63
Şekil 3.6 : Cam atığına ait SEM görüntüsü.....	63
Şekil 3.7 : Cam atığının kümülatif elek altı eğrisi..	64
Şekil 3.8 : Mermer atığına ait X-ışınları difraktogramı (C:Kalsit).....	65
Şekil 3.9 : Mermer atığına ait SEM görüntüsü.	65
Şekil 3.10 : Mermer atığının kümülatif elek altı eğrisi..	66
Şekil 3.11 : Seramik atığına ait X-ışınları difraktogramı (A:Anortit, C:Kalsit, Q:Kuvars).....	67
Şekil 3.12 : Seramik atığına ait SEM görüntüsü.....	67
Şekil 3.13 : Seramik atığının kümülatif elek altı eğrisi.....	68
Şekil 3.14 : Granit atığına ait X-ışınları difraktogramı (A:Anortit, Q:Kuvars).....	69
Şekil 3.15 : Granit atığına ait SEM görüntüsü.....	69
Şekil 3.16 : Granit atığının kümülatif elek altı eğrisi.....	70
Şekil 3.17 : Elazığ kuvarsit maden ocağı	71
Şekil 3.18 : Gaz betonda kullanılan kuvarsit.	71
Şekil 3.19 : Kuvarsite ait X-ışınları difraktogramı (Q:Kuvars).....	72
Şekil 3.20 : Kuvarsite ait SEM görüntüsü.....	72
Şekil 3.21 : Kuvarsite ait kümülatif elek altı eğrisi.....	73
Şekil 3.22 : Çimentoya ait X-ışınları difraktogramı (A:Albit, B:Belit, G:Jips, F:Ferrit, P:Portlandit, Ah:Anhidrit, Pk:Periklas, Al:Aluminat, CS:Kalsiyum Silikat).....	74
Şekil 3.23 : Çimentoya ait SEM görüntüsü.....	74
Şekil 3.24 : Çimentoya ait kümülatif elek altı eğrisi.....	75
Şekil 3.25 : Gaz betonda kullanılan alçı taşı.....	76
Şekil 3.26 : Alçı taşına ait X-ışınları difraktogramı (G:Alçı taşı, A:Anhidrit).....	77

Şekil 3.27 : Alçı taşına ait SEM görüntüsü.....	77
Şekil 3.28 : Alçı taşına ait kümülatif elek altı eğrisi.....	78
Şekil 3.29 : Gaz betonda kullanılan kireç.....	79
Şekil 3.30 : Kirece ait X-ışınları difraktogramı (<i>P:Portlandit, C:Kalsit</i>).....	80
Şekil 3.31 : Kirece ait SEM görüntüsü.....	80
Şekil 3.32 : Kirece ait kümülatif elek altı eğrisi.....	81
Şekil 3.33 : Gaz betonda kullanılan alüminyum tozu.....	82
Şekil 3.34 : Deneş numunelerinin üretim şeması.....	83
Şekil 3.35 : Deneş numunelerinin hazırlanıp karıştırma aşaması.....	84
Şekil 3.36 : Deneş numunelerinin döküm (a) ve genişleme (b) aşaması.....	85
Şekil 3.37 : Deneş numunelerinin kütleme aşaması (a,b) ve nihai ürün (c,d).....	86
Şekil 3.38 : Nihai ürünler ve gözenek görünümü.....	87
Şekil 3.39 : Master sizer ile tane boyut ölçümü.....	89
Şekil 3.40 : Su emme deneyi.....	92
Şekil 3.41 : Gaz beton numunelerin kapiler su emme değerlerinin belirlenmesi.....	93
Şekil 3.42 : Basınç dayanımı için numuneleri kurutma işlemi.....	94
Şekil 3.43 : Tek eksenli basınç dayanımı ölçümü.....	95
Şekil 3.44 : Ultrasonik dalga hızı ölçüm cihazı.....	96
Şekil 3.45 : Isıl iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı.....	98
Şekil 4.1 : Cam atık katkılı gaz beton numunelerine ait X-ışınları difraktogramları (<i>Q:Kuvars, C:Kalsit</i>).....	101
Şekil 4.2 : Mermer atık katkılı gaz beton numunelerine ait X-ışınları difraktogramları (<i>Q:Kuvars, C:Kalsit</i>).....	101
Şekil 4.3 : Seramik atık katkılı gaz beton numunelerine ait X-ışınları difraktogramları (<i>Q:Kuvars, C:Kalsit</i>).....	102
Şekil 4.4 : Granit atık katkılı gaz beton numunelerine ait X-ışınları difraktogramları (<i>Q:Kuvars, C:Kalsit, A:Anortit</i>).....	103
Şekil 4.5 : Kontrol gaz beton numunesinin (A) SEM görüntüsü.....	103
Şekil 4.6 : Cam atıklı gaz betonların SEM görüntüsü.....	104
Şekil 4.7 : Mermer atıklı gaz betonların SEM görüntüsü.....	105
Şekil 4.8 : Seramik atıklı gaz betonların SEM görüntüsü.....	106
Şekil 4.9 : Granit atıklı gaz betonların SEM görüntüsü.....	107
Şekil 4.10 : Birim hacim ağırlık-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.....	112
Şekil 4.11 : Birim hacim ağırlığın atık miktarına göre yüzdesel değişimi.....	113
Şekil 4.12 : Porozite-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.....	116
Şekil 4.13 : Porozitenin atık miktarına göre yüzdesel değişimi.....	117
Şekil 4.14 : Su emme-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.....	120
Şekil 4.15 : Su emmenin atık miktarına göre yüzdesel değişimi.....	121
Şekil 4.16 : Cam atık katkılı gaz betonun zamana bağlı olarak kapiler su emme değişimi.....	124
Şekil 4.17 : Mermer atık katkılı gaz betonun zamana bağlı olarak kapiler su emme değişimi.....	124
Şekil 4.18 : Seramik atık katkılı gaz betonun zamana bağlı olarak kapiler su emme değişimi.....	125
Şekil 4.19 : Granit atık katkılı gaz betonun zamana bağlı olarak kapiler su emme değişimi.....	125
Şekil 4.20 : Kapiler su emmenin atık miktarına göre yüzdesel değişimi.....	126
Şekil 4.21 : Nem içeriği-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.....	131
Şekil 4.22 : Nem içeriğinin atık miktarına göre yüzdesel değişimi.....	132
Şekil 4.23 : Basınç dayanımı-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.....	135

Şekil 4.24 : Basınç dayanımının atık miktarına göre yüzdesel değişimi.	136
Şekil 4.25 : Ultrasonik dalga hızı-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.	141
Şekil 4.26 : Ultrasonik dalga hızının atık miktarına göre yüzdesel değişimi.....	142
Şekil 4.27 : Isıl iletkenlik-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.....	145
Şekil 4.28 : Isıl iletkenliğin atık miktarına göre yüzdesel değişimi.....	146
Şekil 4.29 : Model 1'in ağ yapısı.	149
Şekil 4.30 : YSA eğitim regresyonu.	150
Şekil 4.31 : Gerçek değerler, tahmin değerleri ve elde edilen hatalar.	151



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

°C	:Santigrat Derece
Å	:Angstrom
Bar	:Basınç birimi
CSH	:Kalsiyum Silika Hidrat
N	:Newton
kN	:Kilonewton
V	:Hız
MPa	:Megapaskal
PÇ	:Portland Çimentosu
µm	:Mikron (10^{-6} m)
µs	:Mikrosaniye
CaO	:Kalsiyum Oksit
SiO₂	:Silisyum Dioksit
AAC	:Autoclaved Aerated Concrete (Gaz beton)
TSE	:Türk Standartları Enstitüsü
XRF	:X-Ray Floresans
XRD	:X-Ray Diffraction (X-ışınları difraksiyonu)
YSA	:Yapay Sinir Ağları
YSH	:Yapay Sinir Hücresi
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
CA	:Cam Atığı
MA	:Mermer Atığı
SA	:Seramik Atığı
GA	:Granit Atığı
K.K	:Kızdırma Kaybı

ÖZET

Doktora Tezi

BAZI ENDÜSTRİYEL VE MADENSEL ATIKLARIN GAZ BETON ÜRETİMİNDE KULLANIM OLANAKLARININ BELİRLENMESİ

NİLGÜN KIZILKAYA

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
168+XII sayfa

2021

Danışman: Doç.Dr. Didem EREN SARICI

Bu çalışmada, farklı endüstriyel ve madensel atıklardan gaz beton üretilmesi ve atıkların gaz beton özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Tez çalışmasının ilk aşamasında cam, seramik, granit ve mermer atıkları temin edilerek gaz beton üretimi için kullanıma hazır hale getirilmek üzere kırma, öğütme, eleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Hazırlanan atıklar gaz beton bünyesinde kullanılan kuvarsit yerine %10-20-30-40-50 oranlarında ikame edilerek çimento, kireç, alçı taşı, alüminyum tozu ve su ile karışımlar hazırlanmış, kalıplarda bekletilerek kabarması ve gözenekli yapı kazanması sağlanmıştır. Daha sonra belirli ölçülerde kesilerek boyutlandırılmış ve 2,3 bar basınç, 135 °C sıcaklıkta kürlenerek sağlam bir yapı oluşması sağlanmıştır. Fiziko-mekanik, kimyasal ve termik testler, XRD, XRF, SEM analizleri ile örneklerin malzeme özellikleri belirlenmiştir. Atık kullanılmadan hazırlanan kontrol numunesinin özellikleri ile kıyaslamalar yapılarak atıkların gaz beton özelliklerine etkileri belirlenmiştir. İkinci aşamada korelasyon analizi ve yapay sinir ağıları modellemeleri ile basınç dayanımını tahminleyecek modeller geliştirilmiştir. Birim hacim ağırlığı değerleri cam ve granit atığı katkısı ile azalırken, seramik ve mermer atığı ilavesi ile artmıştır. Yapılan korelasyon analizleri sonuçlarında gaz betonun malzeme özelliklerinden porozite ile birim hacim ağırlık arasında ters yönlü orta dereceli ilişki, ultrasonik dalga hızı ile arasında ters yönlü zayıf ilişki, su emme ile arasında doğru yönlü çok yüksek ilişki, ısı iletkenlik ile arasında ters yönlü zayıf ilişki olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Birim hacim ağırlık ile su emme arasında ters yönlü yüksek ilişki, ısı iletkenlik ile arasında doğru yönlü zayıf ilişki olduğu belirlenmiştir. Ultrasonik dalga hızı ile ısı iletkenlik arasında doğru yönlü orta dereceli ilişki, su emme ve ısı iletkenlik arasında ters yönlü zayıf ilişki belirlenmiştir. Yapay sinir ağı modellerine göre ise gizli katman aktivasyon fonksiyonu sigmoid, çıktı katman aktivasyon fonksiyonu, doğrusal ve gizli katman nöron sayısı 6 olan model %14,14 MAPE ve 0,047 MSE değeri ile en iyi performansa sahip bulunmuştur. Üretilen gaz beton numunelerin birim hacim ağırlıkları 515,98-630,78 kg/m³, ısı iletim katsayısı değerleri 0,10-0,15 W/mK, basınç dayanımları 0,42-1,99 MPa arasındadır.

Anahtar Kelimeler: Gaz beton, endüstriyel atık, madensel atık, mermer, cam, seramik, granit

ABSTRACT

Phd. Thesis

DETERMINATION OF USAGE POSSIBILITIES OF SOME INDUSTRIAL AND MINERAL WASTES IN AUTOCLAVED AERATED CONCRETE PRODUCTION

NİLGÜN KIZILKAYA

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Mining Engineer
168+XII page

2021

Supervisor: Doç.Dr. Didem EREN SARICI

In this study, it is aimed to produce gas concrete from different industrial and mineral wastes and to determine the effects of wastes on gas concrete properties. In the first stage of the thesis work, glass, ceramic, granite and marble wastes were obtained and subjected to crushing, grinding and screening processes in order to be ready for use for gas concrete production. Mixtures with cement, lime, gypsum, aluminum powder and water were prepared by replacing the quartzite used in aerated concrete at 10-20-30-40-50 ratios, and it was kept in molds to swell and gain a porous structure. Then, it was cut to certain dimensions and sized, and a solid structure was formed by curing at 2,3 bar pressure and 135 °C. The material properties of the samples were determined by physico-mechanical, chemical and thermal tests, XRD, XRF, SEM analyses. By making comparisons with the properties of the control sample prepared without using waste, the effects of the wastes on the gas concrete properties were determined. In the second stage, models to predict compressive strength were developed with correlation analysis and artificial neural network models. While the unit volume weight values decreased with the contribution of glass and granite waste, they increased with the addition of ceramic and marble waste. In the results of the correlation analysis, the material properties of aerated concrete have a moderate inverse relationship between porosity and unit volume weight, a weak inverse relationship with ultrasonic wave velocity, a very high relationship in the direction with water absorption, and a weak relationship in the opposite direction with thermal conductivity has been reached. It was concluded that there is a relationship. It has been concluded that there is a high inverse relationship between unit volume weight and water absorption, and a weak direct relationship between thermal conductivity. A moderately direct relationship between ultrasonic wave velocity and thermal conductivity and a weak inverse relationship between water absorption and thermal conductivity variables were determined. According to the artificial neural network models, the model with the hidden layer activation function sigmoid, output layer activation function linear and the number of hidden layer neurons 6 was found to have the best performance with 14,14% MAPE and 0,047 MSE. The unit volume weight of the produced aerated concrete samples is 515,98-630,78 kg/m³, the heat transmission coefficient values are between 0,10-0,15 W/mK and the compressive strengths are between 0,42-1,99 MPa.

Keywords: Aerated concrete, industrial waste, mineral waste, glass, marble, ceramic, granite

1.GİRİŞ

Artan dünya nüfusu ve kırsal kesimlerden şehirlere yapılan göç, yapı ihtiyacının gün be gün artmasına neden olmuştur. Bu durum beraberinde kaliteli ve daha ucuz yapı üretimi için yapılan araştırmaların artışını getirmiştir. Değişik özellikteki pek çok malzemenin mühendislik ve teknik kurallar uygulanarak bir araya getirilmesi ile inşa edilen yapılarda her bir malzemenin niteliğindeki yeterlilik, yapının tümü üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bunlara ek olarak yapıyı meydana getiren malzemelerin işlevselliğindeki başarı, yapının plan ve detay tasarımları üzerinde etkilidir. Tüm bu faktörlerin etkisiyle teknik ilerleme ve yeni ürünlerin bulunması ve geliştirilmesi çalışmaları hızla devam etmektedir.

Günümüz dünyasında enerji kaynaklarının verimli kullanımı, üretim yaparken ekolojik dengenin korunması, ham madde kaynaklarının sürdürülebilirliğinin gözetilmesi, önemini gittikçe arttıran hususlar olmuştur. Bu bağlamda yapı sektöründe enerji verimliliği yüksek yeni yapı malzemelerinin üretimi, üretimin yeni teknik ve kaynaklarla güncelleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar önemini her geçen gün artırmaktadır.

Yapı malzemeleri konusunda enerji verimliliğinin sağlanabilmesi için yalıtım özelliğinin geliştirilmesi gereklidir. Bir binada enerji kayıplarına bakıldığında binanın dış ortama temasta olduğu yapı elemanlarında enerji kayıplarının gerçekleştiği görülmektedir. Bu nedenle yapı elemanlarının ısı geçirgenliklerinin düşük olması, uygun yalıtım malzemeleri kullanımı tasarruf için önemli bir konudur.

Yeni nesil yapı malzemelerinden bir tanesi olan, yapılarda genellikle duvar malzemesi olarak kullanılan ve diğer duvar malzemelerine göre daha fazla endüstriyel üretimi olan gaz beton, düşük ısı geçirgenliği ve yoğunluğu ile yapı sektöründe her geçen gün artan kullanım yüzdesine sahip kompozit bir yapı malzemesidir. Kompozit malzemeler yapısı ve birbirinden farklı özellikleri olan iki ya da daha fazla malzemenin belirli işlemlerden geçirilip, birleştirilen malzemelerin özelliklerine göre daha dayanıklı yeni malzeme üretilme işlemi sonucunda doğmuştur.

Dünya literatüründe Autoclaved Aerated Concrete (AAC) olarak tanımlanan gaz beton kum, çimento, alçı taşı, sönmemiş kireç ve su karışımına gözenek oluşturuucu madde ilave edilmesi ile elde edilmektedir. Milimetrik olarak kesilerek otoklavlarda nihai kristal yapısı sağlanan

gaz beton gözenekli yapısı sayesinde hafif, iyi ısı yalıtımına sahip, istenen basınç dayanımına ulaşan, hafif beton grubuna giren bir yapı malzemesidir [1].

Gaz beton düşük birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik gibi üstün özellikleriyle yapılarda her geçen gün artan bir kullanım yüzdesine sahiptir ve hücresel beton, köpük beton, gözenekli beton olarak da bilinir. Hava boşluklu yapısı mekanik dayanımı azaltır. Mekanik dayanımı arttırmak için otoklav kütleme işlemi uygulanır. Yüksek basınçlı buhar küre ile jel tipi kalsiyum silikat hidratlar (CSH), kristalin tobermorite dönüşür ve bu sayede malzemenin mekanik dayanımı artar. Ortaya çıkan malzemeye otoklavlanmış gaz beton (AAC), otoklavlanmış hafif beton da denir [2].

1.1 Tezin Amacı

Endüstriyel ve madensel atıkları inşaat malzemesi olarak kullanmak, atıkları bertaraf etmek, gelecek nesiller için mevcut kaynakları korumak, sağlıklı sürdürülebilir bir uygulamadır. Atıkların ve yan ürünlerin değerlendirilmesi ile hem çok kısıtlı olan doğal kaynakların tüketimini azaltarak doğanın zarar görmesi önlenmekte, hem de malzemelerin depolanması ile çevrede meydana gelecek olan sorunlar en aza indirgenmektedir.

Çevre ve doğanın dengesinin korunabilmesi ve doğaya verilen zararın en aza indirilebilmesi için, atıkların yeniden işlenerek kazanılması son derece önemlidir. Geri kazanımla, doğal kaynaklarımız korunmakta, atık oranı azalmakta, enerji tasarrufu ile ekonomiye katkı sağlanıp ve geleceğe yatırım yapılmaktadır. Endüstriyel atıkların ortadan kaldırılması, insan yaşamının güvenliğini, inşaat, konut ve toplumsal hizmetler dahil birçok sektörün verimliliğini, bölgelerin sürdürülebilir gelişimini etkileyen önemli bir etkidir. Endüstriyel atıkların geri kazanılmasında en etkili yöntemlerden biri, atıklardan yapı malzemeleri üretmektir. Bunlardan biri olan gaz beton, atık değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir yapı malzemesidir.

Türkiye’de atıkların geri kazanımı konusunda uzun yıllardır çalışmalar sürmektedir. Kağıt, cam, karton, metal ve plastik gibi atıklar toplanmakta, ham madde kaynağı olarak değişik sektörlerde değerlendirilmektedir. Atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesi ile ekonomik ve çevresel olarak büyük kazanç sağlanmaktadır. Uçucu kül, silis dumanı, cüruf, alüminyum tozu, pirinç kabuğu gibi endüstriyel ve madensel atıkların son yıllarda beton üretiminde kullanılması, atık malzeme geri dönüşümü ve enerji tasarrufu sebebiyle son derece önemlidir. Ham madde aralığını genişletmek ve üretim maliyetlerini düşürmek için

birçok araştırmacı endüstriyel ve madensel atıkların, gaz beton üretiminde kullanılan ham maddeler ile yer değiştirme olasılıklarını araştırmaktadır [1].

Bazı endüstriyel ve madensel atıkları (cam, seramik, mermer ve granit) kullanarak gaz beton örnekleri üretmek ve örneklerin fiziksel, mekanik, kimyasal ve termal özelliklerini belirleyerek standart değerlerle kıyaslama ve atıkların gaz beton üretimi için uygunluğunu ortaya koymak tezin amacını oluşturmaktadır. Atık malzemelerin gaz beton üretiminde kullanılan ana malzeme olan kuvarsit yerine %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında kullanılmasıyla elde edilen ürünlerin malzeme özelliklerinin birbirleriyle kıyaslanması ve optimum üretim oranlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla korelasyon analizi ve yapay sinir ağları ile modelleme teknikleri kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

1.2 Tezin Kapsamı

Çevre kirliliği 1977’li yılların başlarında sanayileşme ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak başlamıştır. Çevre kirliliğine neden olan unsurlar evsel, madensel ve endüstriyel atıklardır. Atıkların başka yerlerde değerlendirilmeleri ile çevre kirliliği azalmakta ve ekonomiye katkı sağlanmaktadır. Çevre dostu teknolojiler ile atıklar yeni malzemelere dönüştürülerek yeniden kullanımları sağlanmakta, çevreye zarar vermeleri önlenmekte ve doğal kaynak tüketimi azalmaktadır. Endüstriyel ve madensel atıkların çevreye en az zarar verecek şekilde bertarafını sağlayacak yöntemlerin kullanılması oldukça önemlidir.

Atık yönetimi ve entegre atık yönetiminden sonra atıkların büyük bir bölümünü kapsayan katı atıkların yönetimi konusu da oldukça önemlidir. Katı atık yönetimi; katı atıkların insan ve çevre sağlığı, mühendislik, ekonomi, kaynakların korunması, estetik ve diğer çevresel konularla ilgili biçimde toplumun üretim ve tüketim alışkanlıklarını da dikkate alarak, atık miktarının kontrolü, toplama, biriktirme, taşıma, aktarma, işleme ve uzaklaştırma bölümlerini kapsar. Temel amaç, istenmeyen malzemenin yok edilmesi yani bertarafıdır. Atık yönetiminin etkili ve sistemli bir şekilde gerçekleştirilmesi, atıkların kontrollü bir şekilde yok edilmesini, geri kazanılmasını, çevreye ve insana verdiği zararın minimuma indirilmesini ve atılan bu malzemelerin geri dönüşümünü sağlamaktadır. Atık, doğru bir şekilde yönetilmezse, önemli bir sağlık tehlikesi oluşturabilmektedir. Bu yüzden atık yönetimi, etkili ve verimli çözümler gerektiren ciddi bir konudur. Ekonomik ilerleme olarak görülen maddi tüketim teşvik edildiğinde; satın alma ve daha sonra çöpe atma sonucunda büyük miktarda katı atık meydana gelmektedir. Geri dönüşüm konusu da; verimli ve etkili bir katı atık yönetim sistemi olarak sıkca karşımıza çıkmaktadır.

Her geçen gün tüketim miktarının arttığı, büyük miktarlarda atık olduğu ve tüm bunların çevresel, sağlık, ekonomik, küresel açıdan sorun olduğu düşünüldüğünde; geri dönüşümün, yaşamımızın temel ihtiyaçları kadar önemli bir konu olması gerekliliği, bu konuda makro açıdan büyük organizasyonların, şirketlerin, kamu kurum ve kuruluşlarının üzerine çok fazla sorumluluk düştüğü, mikro açıdan ise tüketicilerin, tükettiği ürünlerin ne tür sonuçlar doğuracağı, zararlı etkilerinin ne olacağı ve bunları en aza indirmek için neler yapabileceği konusunda bilinçlenmeleri gerekmektedir.

Endüstriyel ve madensel katı atıkların çevreye zarar vermesinin önlenmesi için kaynağında ya bertaraf edilip ya da çevreye zarar verme olasılığının en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu atıkların neden olduğu çevre problemleri arasında, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgârla etrafa yayılma, tozlanma, toprakta süzülme dolayısıyla zehirli madde taşınması ve radyasyon sayılabilmektedir. Bu çevre sorunları nedeniyle, suyun ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu bakımından olumsuz sonuçlar meydana gelmektedir. Tüm bu sorunların çözümlenebilmesi için atıkların farklı kullanım alanlarında değerlendirilip, yok edilmeleri gerekmektedir. Atık malzemeler kullanılarak daha düşük maliyetlerle üretim yapılmakta, çevre kirliliğine neden olan atık maddeler bertaraf edilmekte ve doğal malzemelerin de korunması sağlanmaktadır. Endüstriyel ve madensel atık maddeler konusunda araştırmalar yapılmalı, malzemeler iyi tanımlanarak ve özelliklerine göre en uygun malzeme seçilerek atıklar kullanılmalıdır.

Dünyanın en yüksek cam geri dönüşüm oranı %73 ile Avrupa birliği ülkelerine aittir. Bunu %34 geri dönüşüm oranı ile ABD ve %20 ile Singapur takip etmektedir. Geri dönüşümdeki en büyük engellerden biri değişik türdeki birlikte bulunan camları ayırt etmektir. Bazı cam türleri olan özel gözlükler, temperli cam, borosilikat camlar genellikle geri dönüştürülebilir olarak kabul edilmez [3].

Sanayi bölgeleri içerisinde cam imal eden ve cam işleyen fabrikalar bulunmaktadır. Cam işleyen fabrikalar normal pencere camı, buzlu cam, ısıcam ve oto cam imalatı yapmaktadırlar. Camın işlenmesi sırasında katı atık olarak cam kırığı ve cam parçaları açığa çıkmaktadır. Camın üretimi sırasında da çevreye bir takım etkileri vardır. Bir ton işlenmemiş cam için yaklaşık 1,2 ton hammaddeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunların içerisinde en büyük pay kuvars kumu ve sodadır. Cam üretiminde yoğun bir enerji harcanmakta ve eritme aşamasında hava kirlenmesi meydana gelmektedir. Cam diğer ambalaj malzemeleri içinde geri kazanmaya ve tekrar kullanmaya en elverişli olan malzemedir. Cam gerek yeniden dolum, gerekse eritilerek cam üretimine katılması açısından geri dönüşüme en uygun

malzemelerden biridir. Teknolojik olarak cam kırığı %23-45 oranında üretime yeniden verilmektedir. Bu oranlar cam kalitesinde olumsuz bir değişmeye yol açmadığı gibi fırın kapasite kullanımını arttırmakta ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Cam atıklarının su emmesinin hiç olmaması nedeniyle beton agregası için ideal bir atık malzemedir. Camın sertliğinin yüksek olması, camlı betona oldukça iyi aşınma dayanımı sağlamaktadır. Cam atıklarının betonda agrega olarak kullanılması, beton özelliklerini iyileştirdiği gibi bazı özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Yüksek oranda camın agrega olarak kullanımı betonun birim hacim ağırlığını da azaltmaktadır [4].

Türkiye, 5,2 milyar m³ (13,9 milyar ton) toplam rezervi ile dünya doğal taş rezervinin yaklaşık %40'ına sahiptir. Türkiye'de 3,872 milyar m³ işletilebilir mermer, 995 milyon m³ granit rezervi bulunduğu tahmin edilmektedir. Blok mermer üretimi sırasında yarı yarıya atık meydana gelmektedir. Plaka kesimi sırasında ise en az %15-50 oranında toz olarak atık oluşmaktadır. Batı Avrupa ve Amerika Birleşik Devletlerinde yaklaşık %80 oranında değerlendirilen bu atıkların ülkemizdeki değerlendirme oranı ise sadece %20'dir. Mermer blok ile plakalarının kesilmesi, parlatılması esnasında ortaya çıkan atık mermer tozu ve mermer çamuru miktarı oldukça fazladır. Bu kirleticiler çevreyle uyumlu yönetilmez ve geri kazanılmazsa çoğu atık olarak kalmakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Mermer ve granit üretimi sırasında önemli miktarda mermer tozu, granit tozu, katı atık, mermer ve granit çamuru meydana gelmektedir. Mermer ve granit üretimi çevre ile uyumlu yapılmalıdır. Tehlikeli atık sınıfına girmeyen bu inert atıkların geri dönüştürülmesi ve yeni malzemelerde kullanımı çevre kirliliğinin azalmasına ve ekonomiye katkı sağlayacaktır. Mermer ve granit atıkları, ekolojik dengeyi bozmayan, hava kirliliğine neden olmayan, iklim değişikliklerini etkilemeyen, su kirliliği oluşturmayan, inşaat sektöründe yapı malzemesi üretiminde kullanılan maddelerdir. Mermer ve granit atıklarının değerlendirilmesi halinde çevre kirliliğinin azaltılması, atık malzemenin kontrol altına alınması ve inşaat sektöründe değerlendirilerek ekonomik kazanç sağlanması amaçlanmaktadır [5].

Geleneksel betona alternatif yapı malzemeleri olarak alkali ile aktive edilmiş harçlar ve betonlar araştırılmakta, bu harçların geri dönüşümü ile endüstriyel atıklardan ucuz şekilde üretimi, çevre kirliliğinin azaltılması, dayanıklılığın artırılması, enerji tasarrufu özellikleri, yüksek erken dayanım ve yüksek yanmazlık özellikleri diğer malzemelere göre alkali aktif harçları daha avantajlı hale getirmektedir. Atık seramikler kırılarak çeşitli boyutlara getirilip, beton üretiminde agrega olarak kullanılabilmesi gibi boyutu küçültüldüğünde harç üretiminde kum yerine de kullanılabilir. Seramik malzemeler yüksek sıcaklıklarda

üretildiğinden diğer agregalara göre yüksek sıcaklık dayanıklılığı daha yüksektir. Dolayısı ile yüksek sıcaklığa dayanıklı beton üretiminde kullanılabilir. Seramik malzemeler diğer pişmiş killer gibi öğütüldüklerinde, bağlayıcı özellik göstermekte ve çimento yerine kullanılmaktadır. Ayrıca çimento üretimi esnasında kullanılarak katkı çimentolar da elde edilebilmektedir [4].

Gaz beton, duvar panelleri, blok, zemin, çatı panelleri üretmek için kullanılan bir yapı malzemesidir. Düşük yoğunluğu (1000 kg/m^3 den az), düşük ısı iletkenliği ($0,1 \text{ W/mK}$) ile ısı yalıtımı için uygun bir malzemedir. Yoğunluğu, çimento harç matrisi boyunca hava boşluklarının düzenli dağılımı sonucu düşüktür. Gaz betonda gaz kabarcıklarının oluşmasını, alüminyum tozu gerçekleştirir. Alüminyum tozu, harç içerisinde kireç ve su ile reaksiyona girerek Hidrojen (H_2) gazı meydana getirir. H_2 gazı bünye içerisinde hava boşluklarının oluşmasını sağlar ve gözenekli bir yapı elde edilir [6].

Bu tez çalışması kapsamında cam, mermer, seramik ve granit gibi madensel ve endüstriyel bazı atıkların gaz betonda kullanılabilirlikleri araştırılmıştır. Bu atıkların kullanımının gaz betonun mekanik, fiziksel, kimyasal ve termal özelliklerine etkileri incelenmiştir.

İlk aşamada, kullanılan ham maddeler için, arazi çalışmaları ve malzeme temini gerçekleştirilmiştir. Laboratuvara getirilen numuneler, karışımlar için hazırlanmıştır. Bunun için önce kırma, öğütme ve eleme işlemleri yapılmıştır. Ham maddelerin özgül ağırlıkları ve tane boyut dağılımları belirlenmiştir. Hazırlanan ham maddeler %10-20-30-40-50 oranlarında atıklar kullanılarak gaz beton karışımları hazırlanmıştır. $10 \times 15 \times 30 \text{ cm}$ olan kalıplara karışımlar döküldükten sonra, kabarma işlemi gerçekleştirilip, belirli sıcaklık ve süre ile otoklav kürüne tabi tutulmuştur.

Son aşamada, kür işlemi tamamlanan gaz beton numuneleri üzerinde basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, porozite, su emme, kapiler su emme, nem içeriği, ultrasonik dalga hızı, ısı iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Korelasyon ve yapay sinir ağları analizleri ile atık katkısının etkinliği araştırılmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde özgül ağırlık, tane boyut analizi ve SEM, XRF, XRD gibi kimyasal analizlerle yapıları incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Hafif Beton ve Sınıflandırılması

Beton; çimento, agrega (kum, mıcır, çakıl) ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla meydana getirilen ve bir süre sonra sertleşerek yüksek dayanım kazanan bir yapı malzemesidir. İnşaat sektöründe yaygın uygulama alanı bulan normal betonun birim hacim ağırlığı ve bunun sonucu olarak da ısı iletkenlik katsayısı yüksektir. Betonda yoğunluğun azaltılmasıyla, ısı iletkenlik ve ısı genleşme katsayıları düşmekte, yangına karşı dayanıklılık artmaktadır. Buna karşın, betonun boşluk miktarının artması nedeniyle dayanım düşmekte, aşınmaya dayanıklılık azalmakta, nem duyarlılığı yükselmektedir [7].

Hafif betonlar dayanımın yanı sıra hafiflik, ısı yalıtımı gibi özelliklerin de olması istenen yerlerde kullanılan, yoğunlukları $300-2000 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen betonlardır. Hafif betonun yapı malzemesi olarak kullanılması ile yapı yükü azaltılmakta, düşük yoğunluğu sayesinde de yüksek ısı ve ses yalıtımı gibi yararlar sağlanmaktadır. Hafif betonların boşluk oranları yüksektir. Böyle boşluklu bir yapı,

- a) Normal betonlarda sadece iri agrega kullanılması ($1600-1900 \text{ kg/m}^3$)
- b) Boşluklu agrega yani hafif agrega kullanılması ($400-1100 \text{ kg/m}^3$)
- c) Beton karışımında hava kabarcıkları oluşturulması ($400-1400 \text{ kg/m}^3$) ile sağlanabilir.

Hafif betonlarda, yoğunluk azaldıkça dayanım ve ısı iletkenlik düşer. Yoğunlukları 800 kg/m^3 ün üzerindeki betonların genellikle yük taşıyıcılık özellikleri de bulunmaktadır. Hafif betonlar ısı iletkenlikleri düşük olmakla birlikte boşluklarda toplanacak nemden etkilenmektedir. Bu nedenle bu betonların dış yüzeyleri sıva yapılarak korunmaktadır [8].

Hafif betonlar hem yoğunluk hem de dayanıma göre sınıflandırılabilirler. Taşıyıcı olan hafif betonların birim hacim ağırlığı $1450-1800 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir.

Birim hacim ağırlıklarına göre hafif betonlar üç gruba ayrılır;

- a) Yalıtım Betonları: Birim hacim ağırlıkları $300 \text{ kg/m}^3-800 \text{ kg/m}^3$,
- b) Orta Mukavemetli Hafif Betonlar: Birim hacim ağırlıkları $800 \text{ kg/m}^3-1400 \text{ kg/m}^3$,
- c) Taşıyıcı Hafif Betonlar: Birim hacim ağırlıkları 1400 kg/m^3 den büyük olan betonlardır.

Şekil 2.1 de hafif betonların birim hacim ağırlıkları ve dayanımlarına göre sınıflamaları verilmiştir.

Birim	Yalıtım Betonları			Orta Dayanımlı Betonlar		Taşıyıcı Hafif Betonlar		
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Ağırlık (kg/m ³)								
Dayanım Aralığı	(0.7-2.0 MPa)			(7-14 MPa)		(17-41 MPa)		
Agrega Tipi	Vermikülit			Ponza		Sinterlenmiş Uçucu Kül		
	Perlit			Volkanik Cüruf		Genişletilmiş kil veya şist		
	Gaz ve köpük betonlar					Genişletilmiş cüruf		
Diğer Hafif Betonlar				Kumsuz beton (hafif beton)		Kumsuz beton (Normal Beton)		

Şekil 2.1 : Hafif betonların birim hacim ağırlıkları ve dayanımlarına göre sınıflandırılması.

Hafif betonları, birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanımlarını da göz önüne alarak Çizelge 2.1 deki gibi sınıflandırmak da mümkündür. Bu betonların S1 sınıfındakiler ısı yalıtımının sağlanmasında, bazen de taşıyıcı olarak kullanılır. S2 ve S3 sınıfındaki betonlar orta dayanımlı betonlardır, yalıtım özellikleri de bulunmaktadır. S4, S5 ve S6 betonları ise taşıyıcı hafif beton sınıfına girmektedir.

Çizelge 2.1 : Hafif beton sınıfları.

Hafif Beton Sınıfı	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)
S1	800	1-7
S2	800-1200	7-10
S3	1000-1400	10-14
S4	1300-1800	14-25
S5	1500-1800	25-40
S6	1800-2000	40-70

Çizelge 2.2 de farklı hafif agregalarla yapılmış betonların basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları verilmektedir [7].

Çizelge 2.2 : Hafif agregalarla yapılmış betonların basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları.

Hafif Beton Türü	Agreganın türü	Agreganın birim hacim ağırlığı (kg/m ³)	28 günde beton basınç dayanımı (MPa)	Betonun birim hacim ağırlığı (kg/m ³)
Gaz ve köpük beton	-	-	1,4-4,8	400-600
Kısmen sıkıştırılmış	Genişletilmiş vermikülit ve perlit	64-240	0,5-3,4	400-1120
	Ponza taşı	480-880	1,4-3,8	720-1120
	Genişletilmiş cüruf	480-960	1,4-5,5	960-1520
	Sinterlenmiş uçucu kül	640-960	2,8-6,9	1120-1280
	Genişletilmiş kil ya da şist	560-1040	5,5-8,3	960-1200
	Klinker	720-1040	2,1-6,9	720-1520
Kumsuz beton	Doğal Agregata	1360-1600	4,1-13,8	1600-1920
	Hafif agregata	480-1040	2,6-6,9	880-1200
Taşıyıcı hafif agregalı beton	Genişletilmiş cüruf	480-960	10,3-41,4	1680-2080
	Sinterlenmiş uçucu kül	640-960	13,8-41,4	1360-1740
	Genişletilmiş kil ya da şist	560-1040	13,8-41,4	1360-1840

Hafif beton üretimini sınırlandıran tek faktör hafif agregaya olan ihtiyaçtır. Hafif beton üretiminde volkanik tüfler, sünger taşı, perlit, ponza, magnezyum mikası, tras ve cüruf gibi çeşitli hafif agregalar kullanılmaktadır [9].

Hafif Betonların Avantajları;

- Hafif betonların kullanılmasıyla yapıların ağırlığında önemli bir azalma sağlanır.
- Hafif betonların ısı iletkenlik katsayısı oldukça düşüktür.
- Hafif betonların çoğu ahşap gibi kolayca kesilebilir.
- Hafif beton agregaları saftır.
- Çekme dayanımının, basınç dayanımına oranı yüksek olduğundan rötne (büzülme) çatlakları azalmaktadır.

Hafif Betonların Dezavantajları;

- Boşluklu yapıya sahip olduklarından dayanımları normal betona göre düşük olur.
- Aşınma dayanımları düşüktür.
- Neme karşı kaplanmaları gerekmektedir.
- Elastisite modülleri düşüktür ancak deprem sırasında deplasmanları büyüktür.
- Üretimlerinde daha fazla çimento kullanılmaktadır.
- Hafif agregalı betonlar daha kırılmandır [10].

2.2 Gaz Beton

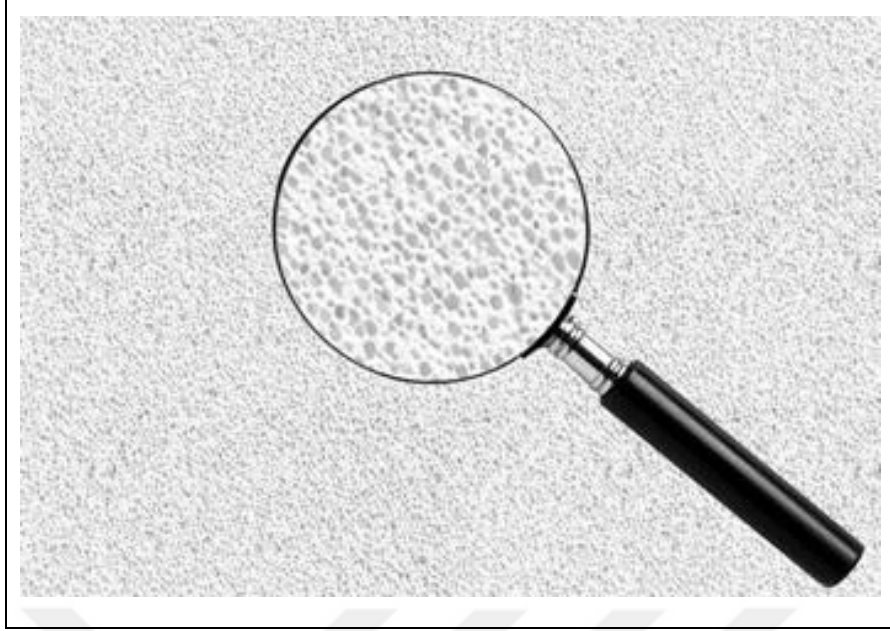
Gaz beton üretim süreci 1900'lerin başında bir dizi patentin alınması ile başlamıştır. Bu süreçte ilk patent ABD de 1914'te Aylsworth ve Dyer'a verilmiştir. Bu patentte çimentolu bir karışımda gaz oluşturuvcu ajanlar olarak alüminyum (Al) ve kalsiyum hidroksit (CaOH) kullanımı yer almaktadır. Avrupada ilk patent ise 1923'te İsveçli bir mimar olan Johan Eriksson'a verilmiştir. Bu patentde ise nem ile kürlenmiş ve otoklavlanmış gaz betonların üretimi alüminyum tozu kullanılarak yapılmaktaydı. Eriksson'un patenti ile ilk ve hala en büyük gaz beton (AAC) üreticilerinden biri olan YTONG kurulup, birçok ülkede YTONG lisansı ile gaz beton üretimi yapılmaktadır. Gaz betonun, fabrika üretimi ilk olarak 1924 yılında İsveç'te başlamış ve daha sonra diğer Avrupa ülkelerinde üretim yayılmaya devam etmiştir.

Tüm üreticilerin üretim süreci için farklı formülleri olmasına rağmen, temel ham maddeler portland çimentosu, kireç, alçı taşı, alüminyum tozu, silis kumu ve sudur. Bazı üreticilerin formüllerinde uçucu kül de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Otoklavlanmış gaz beton (AAC), üretim sürecinde milyonlarca mikroskobik hücrelerden oluşan, diğer beton türlerinden hafif olan bir yapı malzemesidir. Elde edilen nihai ürün kullanılan ham maddelerin hacminin 5 katı kadardır. Gerekli yoğunluk ve mukavemete bağlı olarak hava hacmi %70-80 aralığındadır. Ayrıca diğerlerinin aksine beton ürünleri, yüksek basınçlı otoklavda buharla kürlenir [11].

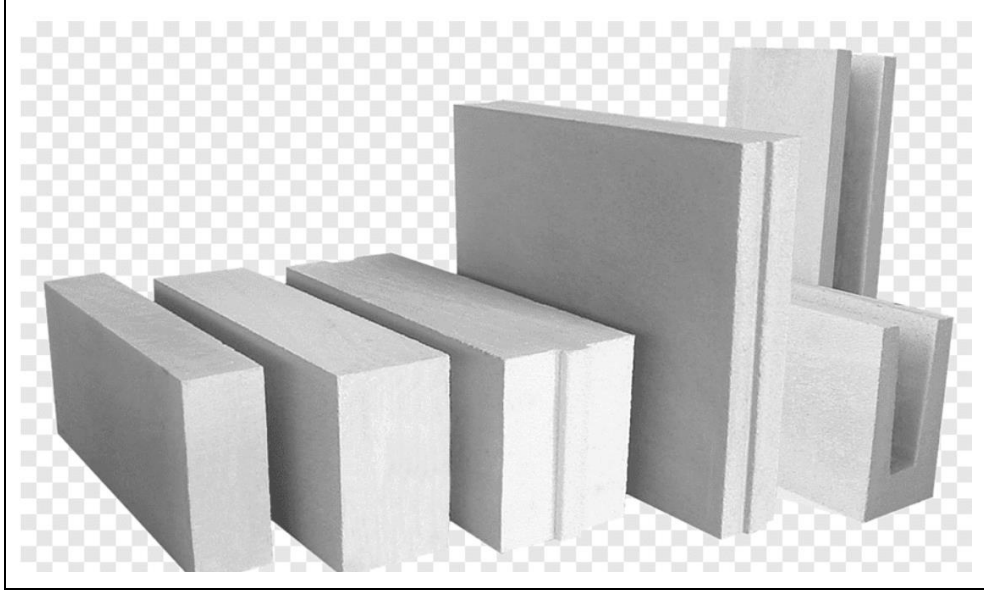
Gaz beton, ince öğütölmüş silis esaslı agrega, gözenek oluşturan maddeler ve su ile birleştirilen, çimento ve/veya kireç gibi bağlayıcılardan üretilmektedir. Ham maddeler birlikte karıştırılmakta ve karışım kabarak kek oluşturabileceği kalıplara dökölmekte, oluşan kek, istenen boyutlarda kesilerek ve otoklavda yüksek basınçlı buhar ile kür işlemi gerçekleştirilmektedir [12].

Genleşme sürecinde Şekil 2.2 teki gibi ürün içinde milyonlarca hava gözeneği oluşmaktadır.



Şekil 2.2 : Gaz betonun bünyesinde bulunan hava kabarcıklarının görünümü [13].

Gaz betonun temel bileşimini kuvars, kuvarsit veya kuvars kumu oluşturmaktadır. Gaz betonunun dayanıklılığını arttıran bu ham maddelerin Silisyum dioksit (SiO_2) miktarının %80 den fazla, alkali miktarının ise %2 den az olması istenmektedir. Basınç dayanımını olumsuz etkilemesi sebebiyle bünyede organik bileşikler ile klorun varlığı istenmemektedir. Alçı taşı (Jips), gaz betonun basınç dayanımını arttırmakta, karışım içindeki kirecin sönme hızını düzenlemekte, rötre (büzülme) özelliğini iyileştirip, dona karşı dayanıklılığı arttırmaktadır. Gaz beton üretiminde kullanılan kirecin, kalsiyum oksit (CaO) miktarının %80 den az olması tercih edilmektedir. Kireç ile karışım suyu reaksiyona girerek Ca(OH)_2 oluşmaktadır. Ca(OH)_2 de SiO_2 ile reaksiyona girerek, gaz betonun temel iskeletini oluşturan hidrate silikat bileşiklerini meydana getirmektedir. Gaz beton üretiminde portland çimentosu kullanılmaktadır. 190 °C sıcaklıkta otoklav, kür işlemi sırasında bağlayıcı ve sertleştirici olarak görev yapmaktadır. Üretiminde kullanılan ham maddeler karışım haline getirilmekte ve karışım kalıplarda bekletilerek kek oluşturulmaktadır. Oluşan kek istenilen boyutlarda kesilerek otoklavlarda kürlenme işlemine tabi tutulmaktadır. Şekil 2.3 te ticari gaz betona ait görüntü verilmiştir [14].



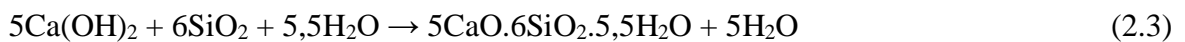
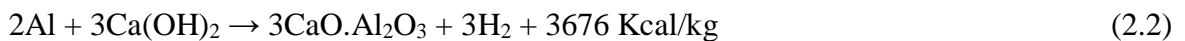
Şekil 2.3 : Ticari gaz betona ait görüntü [15].

2.3 Gaz Betonun Özellikleri

2.3.1 Gaz betonun kimyasal ve mineralojik özellikleri

Gaz beton üretiminde kirletici özelliği olmayan, yan ürün üretmeyen doğal malzemelerin az miktarda ve düşük enerji sarfiyatı ile kullanımı önemli bir avantajdır. Bunların yanısıra kullanım kolaylığı, enerji korunumu sağlaması ile de çevre dostu bir yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır [16].

Gaz beton için, yapılan X ışınları kırınımı (XRD) analizleri ile ana tepkime ürününün kalsiyum silika hidrat (CSH) grubuna ait olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarına bakıldığında, yapının hidrasyon ürünü olan ve bir arada bulunan kristaller karışımı, yarı-kristaller ve amorf tobermoritten oluştuğu görülmektedir. Tobermorit oluşumu (CSH) ile malzemenin mekanik dayanımı artmaktadır. Gaz betonun üretiminde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar Eşitlik 2.1-2.2-2.3 te verilmiştir [17,18].



Gaz beton oluşumunda gerçekleşen ilk reaksiyon, sönmemiş kirecin su ile birleşimi ile başlamaktadır. İkinci reaksiyon ise ilk reaksiyondan ortaya çıkan kalsiyum hidroksitin alüminyum ile birleşmesiyle gerçekleşmektedir. Bu reaksiyon ile çıkan hidrojen gazı

kabarma ve gözenek oluşumunu sağlamaktadır. Üçüncü ve son aşamada ise otoklavda yüksek basınç ve sıcaklık altında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda gaz betonda en çok rastlanan tobermorit (CSH) kristalleri oluşmaktadır [17,18].

Bazı oluşumların SEM görüntülerinde, tobermorit yerine fibröz kalsiyum silikat hidratın (CSH) oluştuğu görülmektedir [2,19].

Gaz beton, silika hidratlardan oluşan alkali bir yapıdadır. pH değeri 9,5- 11,0 arasında değişmektedir. Bu nedenle asidik ortamlardan olumsuz şekilde etkilenmektedir. Sülfirik asit, hidroklorik asit, asetik asit, malzemenin yapısını; kloridler, nitratlar ve sülfatlar ise malzeme içerisindeki donatıyı olumsuz etkilemektedir [20].

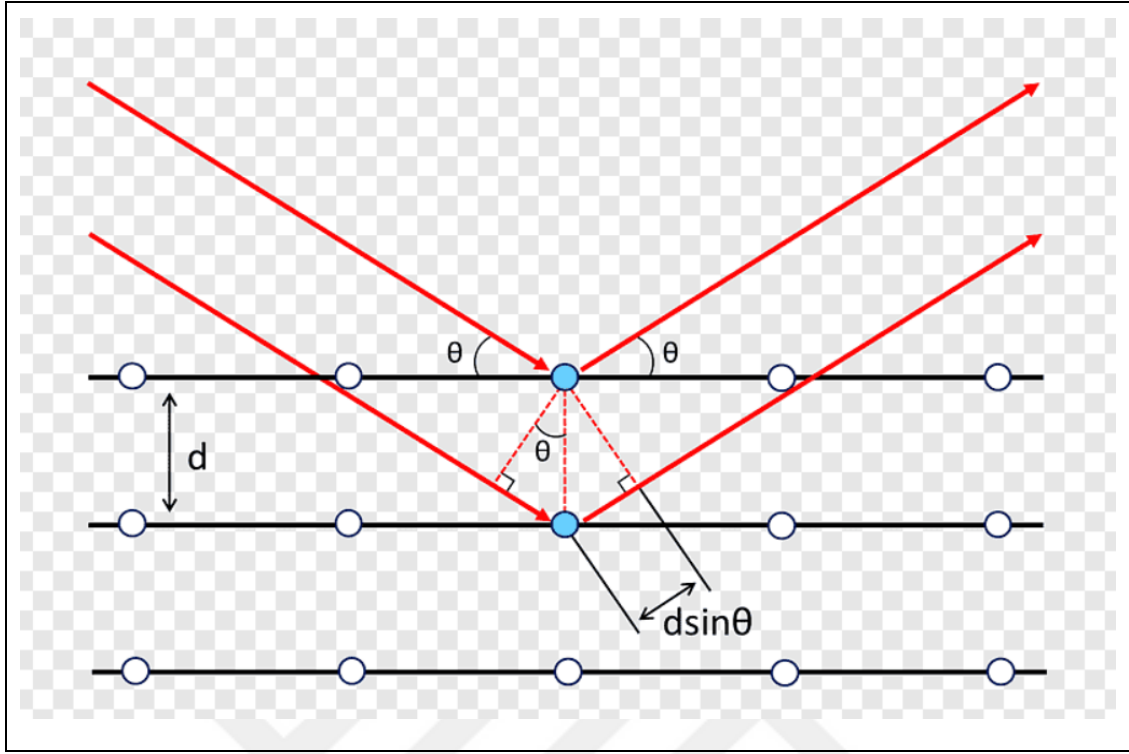
Gaz betonu oluşturan minerallerin kristal şekli, tane dizilimi, tane boyut dağılımı, gözenek boyutları, tane şekilleri, kimyasal içerikleri, bağlayıcı madde ve madde miktarı gibi parametrelerin belirlenmesinde XRD, XRF ve SEM analizleri uygulanmaktadır.

2.3.1.1 X-ışını kırınım yöntemi (XRD)

X-ışını difraksiyonu, malzemelerin kristalografik özelliklerinin ve içerdikleri fazların belirlenmesini sağlayan hasarsız bir analiz yöntemidir. Bir difraktometre genellikle bir X-ışını jeneratörü, numunenin dönmesi ve difraksiyon açılarının ölçülmesi için bir gonyometre ve difrakte ışını ölçmek, büyütme, kaydetmek için daireleri hesaplayan bir X-ışını sayıcı tüpünden oluşmaktadır. Bir difraktogram difraksiyon açısına karşın sürekli olarak şiddeti kaydetmektedir. Kayıtlar grafik halinde veya bazı çıktı aletlerinde doğrudan alınmaktadır. Malzeme üzerine gönderilen bir X-ışını yapı üzerine çarptığında ışınlarda genel bir saçınım olmaktadır. Saçınım yapan ışınlar bunlara dokunmakta veya bozuluma uğratmaktadır. Bununla birlikte belirli yönlerde saçınım yapan ışınlar bir diğeri ile faz halindedir ve yeni dalga şeklini oluşturmaktadır. Bu kasılmış girişim difraksiyon olarak tanımlanmaktadır. Oluşan difraksiyonun yönü kristalin birim hücrelerinin şekline ve boyutuna bağlıken, difraksiyonun şiddeti, gerçek atomik dizilim veya kristal yapısının doğasına bağlıdır [21].

X-ışını difraksiyonu: n , bir tamsayı, λ , kullanılan metalin X-ışınının dalga boyu, Θ , X-ışınının gelme açısı ve d , kristalin atom düzlemleri arasındaki mesafe olup bir yansıma oluşmaktadır. Şekil 2.4 te Bragg yasasının gösterimi verilmiştir. Yansımanın oluşma şartları Eşitlik 2.4 göre tanımlanmaktadır.

$$n\lambda=2d \sin\Theta \quad (2.4)$$



Şekil 2.4 : Bragg yasasının gösterimi [22].

Toz numunelere uygulanan X-ışını difraksiyonu ile kristal yapısı, tane boyutu gibi özellikler belirlenebilmektedir. Bu yöntem ile kayaların, kristalin malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin kalitatif ve kantitatif incelemeleri yapılabilmektedir. X-ışını kırınım analiz yöntemi, işlem sırasında numuneyi tahrip etmemekte ve çok az miktardaki malzemelerin analizlerinin yapılmasını sağlamaktadır. X-ışını kırınım yöntemi (XRD), her bir kristal düzenine sahip olan malzemenin kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması prensibine dayanmaktadır. Her bir kristal ya da faz için bu kırınım desenleri parmak izi gibi o kristali tanımlamaktadır. Yapay X-ışını üreten tüpe sahip cihaz elektromanyetik dalga ile aynı dalga boyuna sahip olacak şekilde saçınım yapar. X-ışınının doğru bir açıyla kırılması ve saçılması için pürüzsüz bir yüzeye sahip olan numuneye X-ışını gönderilir. Numuneye gelen X-ışını, farklı açı ve şiddetlerde yansımaktadır. Bunun sonucu olarak, analiz edilen malzeme içerisindeki mineralojik ve elementel bileşim tespit edilmektedir [21,23].

2.3.1.2 X-ışınları floresans spektrometresi (XRF)

X-ışınları floresans spektroskopisi (XRF) elementel kompozisyonun belirlenmesinde kullanılan önemli yöntemlerden biridir. Genel olarak foton-madde etkileşmesi sonucunda

oluşan karakteristik X-ışınları ve saçılma fotonlarının nitel ve nicel değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. X-ışını floresans spektrometresinin genel çalışma prensibi gaz haldeki elementel atomların ışın üreterek, absorbe ettikleri enerjiyi, daha sonra temel hale dönerken ışıma yaparak vermeleri üzerinedir. Radyasyon kaynaklarından biri olan X-ışınları tüpü, kapalı kaynak sınıflamasına girmektedir. Her malzemenin karakteristik ışın emisyonu, farklı özellikler göstermekte ve her element için ayrı enerji pikleri bulunmaktadır. Numune üzerine düşürülen X-ışınları ile malzeme içerisinde var olan elementlerin yörüngelerine X-ışını çarparak temel enerji seviyesine dönmesi sağlanmaktadır.

Nicel ve nitel analiz yapan XRF cihazı yapısında yer alan özel bir kristalde ışınların kırınımına uğraması sonucu dalga boylarına ayrılması ve şiddetlerinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Analiz edilen malzemelerden elde edilen X-ışınlarının enerjisini hesaplayarak elementleri tayin ederken gelen ışınları da sayarak element miktarlarının belirlenmesini sağlar. Bu analiz, katı (mineral, metal, kayaç, toprak), sıvı (su, yağ, petrol ürünleri) ve preslenmiş toz gibi farklı şekillerdeki malzemelerin, ağır metal konsantrasyonlarını (Na-U element aralığında) yüzdelik (%) ve milyonda birlik (ppm) cinsinden yarı kantitatif olarak analiz edilmesine imkan sağlamaktadır. XRF yöntemi ile element analizi, mineraloji, jeoloji, metalurji, değerli taş, malzeme bilimi, kimya, petrol (yakıt) analizi, boya endüstrisi, tarım, gıda teknolojisi, sanat tarihi, arkeoloji gibi çalışma alanlarında uygulanmaktadır [21,24].

2.3.1.3 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

İnsan gözünün çok ince ayrıntıları ve çok küçük boyutları görebilme imkânı sınırlıdır. Bu sebeple görüntü iletimini sağlayan, ışık yollarının mercekle değiştirilerek, daha küçük ayrıntıların görülebilmesine imkân sağlayan optik cihazlar geliştirilmiştir. Fakat bu cihazlar, büyütme miktarlarının sınırlı oluşu ile elde edilen görüntü üzerinde işlem yapma olanağı olmaması nedeniyle birçok bilim adamını yeni sistemler geliştirmeye yönlendirmiştir. Optik ve elektronik sistemlerin birlikte kullanılması ile yüksek büyütme üzerinde işlem ve analizler yapılabilen görüntülerin elde edildiği cihazlar geliştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskoplarının ayırım gücünün yüksek olması sebebiyle minerallerin tanımlanması kolaydır. SEM çalışmaları ile minerallerin morfolojisi yanında dokusal ilişkileri ve büyüme özelliklerinin de tanımlanması yapılabilmektedir. Bu mikroskoplarda yapılacak görüntü analizlerinde, genellikle 1000-35000 oranlarında büyütme kullanılmakta ve numunelerde Au-Pd kaplamaları yapılmaktadır. SEM'in en önemli özelliği odak derinliğinin olmasıdır.

Özellikle morfolojik ayrıntıların görüntülenmesinde bu özellikten yararlanılmaktadır. Metaller gibi iletken malzemeler doğrudan incelenebilirken seramik gibi yalıtkan malzemeler, mikroskoba konulmadan önce iletken bir tabaka ile kaplanmaktadır [23].

SEM (Scanning Electron Microscope) veya Taramalı Elektron Mikroskobu, çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışır. Taramalı elektron mikroskobunda (SEM), yüksek enerjili elektronlar numune ile etkileşerek elektron ve foton sinyalleri meydana getirir. Farklı açılarda saçılan elektronlar, dedektör (algılayıcı) tarafından toplanır ve toplanan sinyallerin mikroskop yazılımı ile işlenmesi sonucunda görüntüler elde edilmektedir. Gönderilen elektronlar ile numunedeki atomlar etkileşerek, numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretilir. Elektron demeti yüzeyi tarayarak ve demetin konumu, algılanan sinyal eşleştirilerek görüntü meydana gelir. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile malzeme etkileşimi sonucunda meydana gelen farklı elektron ve ışınları toplayan dedektörler, sinyal çoğaltıcılar ve malzeme yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır. Ayırım gücü, odak derinliği ile görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği, taramalı elektron mikroskobunun kullanım alanını genişletmektedir. SEM görüntüleri, jeoloji, inşaat, maden, kimya, biyoloji ve malzeme bilimi gibi birçok farklı disiplinde kullanılmaktadır [24].

2.3.2 Gaz betonun fiziksel özellikleri

Gaz beton, üretiminde doğal ham maddelerin kullanıldığı toksik veya zararlı maddeler içermeyen çevre dostu bir kompozit malzemedir. Üretimi esnasında düşük enerji tüketimi ister. Buna karşılık binalarda yüksek enerji verimliliği ve daha iyi iç mekân hava kalitesi sağlar. Gaz beton gözenekli yapısı ile düşük yoğunluğa ve yüksek ısı yalıtım kapasitesine sahiptir. Gözenekli yapısı gaz betona düşük yoğunluk özelliği kazandırmaktadır. Gaz beton, kullanılan silisli ham maddeye bağlı olarak gri, beyaz veya pembe renkler alabilir. Bünyesinde kuvarsit bulunan gaz betonların renginin genellikle beyaz olduğu gözlemlenmektedir [18,25].

İnorganik yapısı ile gaz beton yapı malzemeleri A1 sınıfı yanmaz malzeme grubunda yer alır. Yüksek ısı ile temas halinde 225-450 °C arasında malzeme bünyesinde basınç dayanımına etki etmeyen kılcal çatlaklar gelişmektedir. 500 °C den sonra çatlak sayısı artmakta, sinterleşme başlangıç sıcaklığı olan 740 °C den sonra ise dayanım hızla düşmektedir. 1100-1200 °C de gaz beton erimektedir.

Gaz betonun fiziksel, mekanik, kimyasal, termal özellikleri bünyesinde bulunan nem miktarına bağlıdır. Gözenekli yapısı ile hacimce %30-35 oranında nemi bünyesine alabilmektedir. Bünyesine giren nem soğuk hava koşullarında donarak hacimsel genişlemeye uğramakta, bu da basınç dayanımı azaltmaktadır [25].

Bunlara ek olarak gaz betonun bünyesine giren ham maddelerin tane boyutları, karışım oranları, gaz oluşturuucu madde miktarı, su miktarı, otoklavda uygulanan kür koşullarının da, fiziksel özellikler üzerinde etkili olduğu bilinmektedir.

Gaz beton bünyesine giren kuvarsın tane boyu küçüldükçe reaktifliğin arttığı, ancak bu durumun bünyede istenmeyen jiroolit minerali oluşumunu sağladığı bilinmektedir. Su-katı oranındaki artış viskozluğu azaltarak, kütle yoğunluğunun düşmesine ve hava boşluklarının kolay oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum yoğunluğu da etkilemektedir. Bu nedenle yapılacak çalışmalar ile gaz betonun kütleleme koşullarının belirlenmesi, fiziksel özelliklerin üzerinde etkili olmaktadır.

Su-katı oranının değişimi gaz betonun kütle yoğunluğu üzerinde Al tozu miktarındaki değişmeden daha önemlidir. Gaz beton üretiminin ilk aşamasında optimum su-katı oranının belirlenmesi önemlidir. Gaz betonun yoğunluğunu, ön işlemler olan ham maddelerin karıştırılıp gaz oluşturulması ve ön kür işlemleri belirlemektedir. Basınç dayanımını arttıran unsur ise otoklav kürüdür [2].

Bu malzemenin düşük yoğunluğu, geleneksel betonun üçte birinden, yarısına kadar daha hafif olmasını sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak kullanımı daha kolay olmakta, inşaat süresini azaltmakta ve nakliye maliyetlerinde tasarruf sağlamaktadır. Gaz betonun (AAC) ısı yalıtımı, yüksek ısı kapasitesine, nispeten büyük miktarlarda ısı enerjisini emme ve tutma özelliğine sahiptir. Gaz betonun (AAC), diğer betonların yaklaşık iki katı kadar yangın dayanımı sağlamaktadır. Gaz betonun (AAC) işlenebilirliği; eşsiz özelliklerinden biridir [11].

Yapı malzemeleri, başlangıçta içerdikleri üretim, nakliye ve inşaat nemini zaman içinde atarak, belli bir nem derecesinde sabitlenir. Denge nemi adı verilen bu durum, gaz betonda yoğunluğa ve ortamın bağıl hava nemine bağlı olarak küçük farklılıklar gösterebilir.

Gaz beton, gözenekli yapısı nedeniyle düşük buhar geçirgenlik direncine ($\mu=5-7$) sahiptir. Bu özellik, gaz betonun yapıda kolaylıkla nefes almasını sağlamaktadır. Ancak, özellikle soğuk bölgelerde don olayının, gaz beton sıvasız bırakıldığı durumlarda, bünyesine büyük zarar verdiği bilinmektedir [26].

2.3.2.1 Birim hacim ağırlık (Yoğunluk)

Gaz beton içerisinde gözle görülen küçük boyutlarda gözenek ve boşluklar bulunmaktadır. Gözenek ve boşluk yapısı fazla olan gaz betonun birim hacim ağırlığı (yoğunluk) değeri de düşük olmaktadır. Gaz betonun birim hacim ağırlığındaki azalma mekanik özelliklerini de etkilemektedir. Düşük su emme değerine, gözenekliliğe, yüksek birim hacim ağırlığına sahip olan gaz betonların, mekanik dayanımları da genel olarak yüksektir. Gaz betonda bünyeye giren su/çimento malzeme oranı, kabarmayı dolayısıyla yoğunluğu etkilediğinden önemli bir parametredir.

Gaz betonun su emme, kapiler su emme, porozite, nem içeriği, basınç dayanımı, ısı iletkenlik, ultrasonik dalga hızı gibi birçok özellik birim hacim ağırlığına bağlıdır. Yapısal ve fonksiyonel özelliklerin üstün olmasında gözeneklerin duraylı ve küresel olması, ayrıca gözeneklerin kütle boyunca homojen bir şekilde dağılması önemlidir. Birim hacim ağırlığı porozite ile yakından ilgilidir. Birim hacim ağırlığı değiştirmek için sadece kimyasal reaksiyonla üretilecek gözenek hacmi ayarlanmalıdır.

Gaz beton sınıflandırılmasında birim hacim ağırlığı esas alınmaktadır. Gaz beton boşluklu yapısı sayesinde yoğunluğu 300-1800 kg/m³ arasında değişirken, boşluksuz yoğunluğu yaklaşık olarak 2600 kg/m³'dir [25].

2.3.2.2 Porozite

Gaz beton oluşurken meydana gelen boşluk hacminin gaz betonun toplam hacmine oranı porozite veya gözeneklilik olarak isimlendirilir. Gaz betonun boşluksuz hacminin, toplam hacime oranı kompasite (doluluk oranı) olarak adlandırılmaktadır. Gaz betonun kompasite değerinin düşük olması, porozite değerinin yüksek olduğunu ifade etmektedir.

Boşluklar ve boşlukların boyutları, dağılımı, betonun dayanım, geçirgenlik ile rötre (büzülme) gibi fiziksel özelliklerin belirleyicisidir.

Gaz betonu oluşturmak için eklenen alüminyum tozu ve kirecin reaksiyonu sonucu üretilen H₂ gazı sayesinde gaz beton bünyesinde hava kabarcıkları oluşur ve beton matrisinde homojen bir şekilde dağılarak gözenekli yapıyı meydana getirir.

Gaz beton, gözenekli yapısı nedeniyle genellikle, normal betondan daha fazla su emer. Ancak, inşaat uygulamalarında, su emilimi genellikle kritik bir sorun olarak değerlendirilmez. Bunun nedeni, uygulamalarda gaz betonun yüzeyinin sıvanması ve suyla temasın engellenmesidir. Bununla birlikte, sıva etkisiz ise veya istenilen şekilde

yapılmamışsa, neme maruziyet sonucunda yüksek gözeneklilik nedeniyle malzemenin nem içeriği etkilenecektir. Gözeneklilik, gaz betonun temel özelliklerinden bir tanesidir. Ayrıca gaz betonun diğer özelliklerini de etkiler. Bu nedenle, taşıyıcı gaz beton ile uygun bir tasarım geliştirmek için betonun gözeneklilik-mukavemet ilişkisine çok dikkat edilmelidir. Gaz betonda yoğunluk ve basınç dayanımı ile gözeneklilik arasında ters bir ilişki vardır. Çizelge 2.3 te gaz betonda gözlenen farklı birim hacim ağırlığı değerleri için elde edilen porozite değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Gaz betonun çeşitli birim hacim ağırlıkları için porozite değerleri [18].

Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Porozite (%)
310-400	85-88
410-500	81-85
510-600	77-81
610-700	73-77
710-800	69-73

2.3.2.3 Su emme

Su emme malzemenin ağırlık veya hacimce emmiş olduğu suyun yüzdesi olarak ifade edilir. Su emme işleminde önce büyük boyutlu kapiler boşluklar daha sonra da küçük boyutlu kapiler boşluklar su ile dolu duruma gelmektedir. Bu nedenle gaz betondaki su emme ilk anlarda büyük bir hızla gelişirken zamanla bu hız düşmektedir. Su emme hızı ve emilen su miktarı gaz betonun ne oranda kuru olduğuyula da ilişkilidir. Gaz betonun emebileceği su miktarı, içerisindeki toplam boşluk hacmi ile ilgilidir. Gaz betonun gözenekliliği ile bünyesine aldığı su ve su buharı miktarı arasında güçlü bir etkileşim vardır. Kuru durumda, gözenekler boştur. Daha yüksek nemli bölgelerde bazı gözenekler su ile doluyken bazı gözeneklerde su buharı difüzyonu hakimdir [27].

2.3.2.4 Kapiler (kılcal) su emme

Su ile temas eden gaz beton için ilk olarak kapiler su emme söz konusudur. Bu mekanizmalar, nem taşınmasındaki su içeriğinin ve gözenek boyutu dağılımının etkisini tahmin etmeyi zorlaştırır. Kapiler su emme, malzemenin suya temas eden yüzeyinden zamanla emilen su miktarı ile belirlenmektedir. Çok küçük çaplı boşluklar içinde kılcallık etkisi ile su malzeme içinde yükselir. Malzemenin kılcallık özelliğini saptamak için önce kuru ağırlığı tartılır, sonra malzeme suyun yüzeyine degecek şekilde uygun bir kaba

yerleştirilir. Belirli zaman aralıklarında yapılan ağırlık ölçümleri ile emilen su miktarı bulunmaktadır.

Yapılarda kılcal etki ile emilen sular zamanla buharlaşırken verdikleri tuzlar geride kalarak sıva ve boyayı bozmaktadır. Ayrıca sağlık yönünden de bu durum zararlıdır. Bu sakıncaları önlemek için suyun girdiği yüzeyler zengin çimentolu sıvalar, boyalar, bitüm ve benzeri malzemelerle yalıtılmaktadır [8].

2.3.2.5 Nem içeriği

Ortamın nem durumu, yapıların tasarımında değerlendirilmesi gereken önemli bir faktördür. Nem oranının artmasıyla basınç dayanımı azalmaktadır [28].

Gaz beton gözenekli yapıya sahip olması sebebiyle bünyesine hacminin %30-35 i arasında nem alabilen bir malzemedir. Yüzdesel olarak belirlenen nem miktarı, atmosfer basıncında numuneyi, etüvde kurutarak oluşan nem kaybını belirlemek ve nem içeriğini % olarak hesaplamak suretiyle tayin edilmektedir. Bunlara ek olarak yaygın olarak kullanılan nem analiz teknolojileri, nem belirleme cihazı ve etüv ile terazinin birlikte ölçüm yapması ile belirlenmektedir. Nem miktarı gaz betonun mekanik, fiziksel, ısı iletkenlik gibi önemli malzeme özelliklerini etkileyen bir faktördür [29].

Ortam sıcaklığının yanı sıra, gözenekli yapısı nedeni ile gaz beton ortamın neminden oldukça fazla etkilenmektedir. Gaz betondaki nem içeriği, ısı iletim katsayısını etkileyen faktörden biridir. Binalarda, duvarlar ve çatıda kullanılan gaz beton genellikle test şartlarına göre daha çok nem içermektedir. Dış havanın nemi ve iç ortam koşulları da gaz betonun nemini belirlemede önemli rol oynar [30].

2.3.3 Gaz betonun mekanik özellikleri

2.3.3.1 Basınç dayanımı

Madencilik, inşaat, jeoloji biliminde yapı ve tasarım da önemli bir özellik olarak kullanılan basınç dayanımı gaz betonda mekanik özelliklerin belirlenmesinde ve gaz betonun sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılan bir parametredir.

Basınç dayanımı, gaz beton numuneleri için en önemli mekanik özelliklerden bir tanesidir. Gaz betonun basınç dayanımı; birim hacim ağırlığı, nem içeriği, gözeneklilik derecesi, gözeneklerin boyutu, gaz beton bünyesinde oluşan tobermorit mineralinin oluşum oranı gibi malzeme özelliklerine bağlı olduğu kadar, betonun yaşı, kuvvetin uygulanma yönü, gaz

betonun kürlenme yöntemleri gibi faktörlere de bağlıdır. Gaz beton basınç dayanımı genellikle beton döküldükten 7 ve 28 gün sonra minimum üç numune üzerinde testler gerçekleştirilerek belirlenir. Gaz betonun elastisite modülü, kuru birim hacim ağırlığına ve basınç dayanımına bağlı olarak değişmektedir. Gaz betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının yaklaşık 1/6'sı, yani 2-12 kg/cm² arasında değişmektedir. Gaz betonun eğilme-çekme dayanımı, basınç dayanımının 1/5'i, yani 3-15 kg/cm² arasında değişmektedir. Ticari bir gaz betonun özellikleri Çizelge 2.4 deki gibidir [25].

Çizelge 2.4 : Gaz betonun özellikleri [25].

Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Isıl iletkenlik (W/m °C)
400	1,3-2,8	180-1170	0,07-0,11
500	2,0-4,4	1240-1840	0,08-0,13
600	2,8-6,3	1760-2640	0,11-0,17
700	3,9-8,5	2420-3580	0,13-0,21

Malzemenin basınç dayanımı 10x10x10 cm boyutlarındaki küplerin ağırlıkça %10 neme erişinceye kadar kurumamasından sonra, dayanım cihazında kuvvet uygulanarak kırılması ile bulunmaktadır. Gaz beton basınç dayanımı, kuru birim hacim ağırlığına ve içerdiği nem miktarına bağlıdır. Gaz beton, içerdiği nem oranında mukavemet kaybetmektedir. Bu değişim, tam kuru malzeme ile suya doymuş malzeme arasında %35 derecesindedir [25].

2.3.3.2 Ultrasonik dalga hızı

Madencilik, inşaat, jeoloji ve geoteknik bölümlerinin yaptıkları çalışmalarda ultrasonik dalga hızı yöntemi, hasarsız, kolay uygulanabilir ve güvenilir olması nedeniyle beton ve kayaç numunelerinin mekanik (dayanım) özelliklerini değerlendirmek için kullanılan yöntemlerdendir [31].

Betonun mekanik özelliklerinin dolaylı ama güvenilir yöntemlerle belirlenmesi, inşaat yapı planlaması ve tasarımında oldukça önemlidir. Ultrasonik dalga hızı bu amaçla kullanılan özelliklerden biridir [32].

Ultrasonik dalgalar üç farklı yayılıma sahip dalgadan oluşur. Bunlar P-dalga (eksenel-boyuna), S-dalga (kesme) ve R-dalga (Rayleigh) yayılımıdır. Gaz beton ölçümünde en çok kullanılan P ve S dalgalarıdır. Gaz betonun yoğunluk, tane boyutu, tane şekli, porozite, nem içeriği, anizotropi, sıcaklık gibi parametreler ultrasonik dalga hızını etkilemektedir. Ultrasonik testlerle gaz betonun homojenliği, yapısında bulunan çatlaklar, boşluklar, yangın ve kimyasal olaylarla yapısında meydana gelen değişiklikler hakkında bilgiler elde edilebilmektedir [31].

2.3.4 Termik özellikler

2.3.4.1 Isıl iletkenlik

Isıl iletkenlik bir malzemenin farklı sıcaklıktaki iki bölgesi arasında, yüksek sıcaklıktan, düşük sıcaklığa ısının iletilmesi olayıdır ve malzemenin ısı iletim kabiliyetini karakterize etmektedir. [33].

Isıl iletkenliği, homojen bir malzemenin kararlı durum koşulları altında, iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu birim zamanda (1 saat), birim alandan (1 m^2), bu alana dik yönde birim kalınlıktan (1 m) geçen ısı miktarıdır. Birimi W/mK ' dir. Bir malzemenin iki tarafında farklı bir sıcaklık var ise sıcaklığın yüksek olduğu tarafa doğru bir sıcaklık akımı (difüzyon) meydana gelmektedir. Birim zaman ve birim alanda malzeme içinden geçen ısı miktarı, ısı iletkenlik katsayısı ile orantılıdır. Birim hacim ağırlığı düşük olan malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları da düşüktür. Buna etki eden ikinci sebep nem miktarı olup, nem miktarı arttıkça malzemenin ısı iletkenliği de artar. Gaz betonda ısı iletkenlik katsayısının düşük olması istenir. Bu nedenle ısı kaybı az olacak ve o malzeme izolasyon (yalıtım) malzemesi olarak kullanılabilir [8].

Gaz betonun, ortam sıcaklıkları değiştikçe ısı iletkenlik katsayıları da değişmektedir. Bu sebeple farklı iklim koşullarında ısı performansın ve enerji verimliliği tasarımının doğru olarak saptanabilmesi için gaz betonun sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısının tespit edilmesi gerekmektedir [30].

Isıl iletkenlik yoğunluğa, nem içeriğine ve malzemenin bileşenlerine bağlıdır ve büyük ölçüde yoğunluğun bir fonksiyonu olduğundan, ısı iletkenlik söz konusu olduğunda ürünün nemli veya otoklavlanmış olmasının yanısıra gözeneklerin miktarı ve dağılımı da ısı yalıtımı için etkilidir. Gözenekler ne kadar ince olursa yalıtım o kadar iyi olur [25].

Gaz betonun %80'ini oluşturan makro ve mikro gözenekler, ısı iletkenlik değerini dūşürmektedir. Kuru gaz betonun ısı iletkenlik değerleri Çizelge 2.5 de verilmiştir.

Çizelge 2.5 : Kuru gaz betonun ısı iletkenlik değerleri [18].

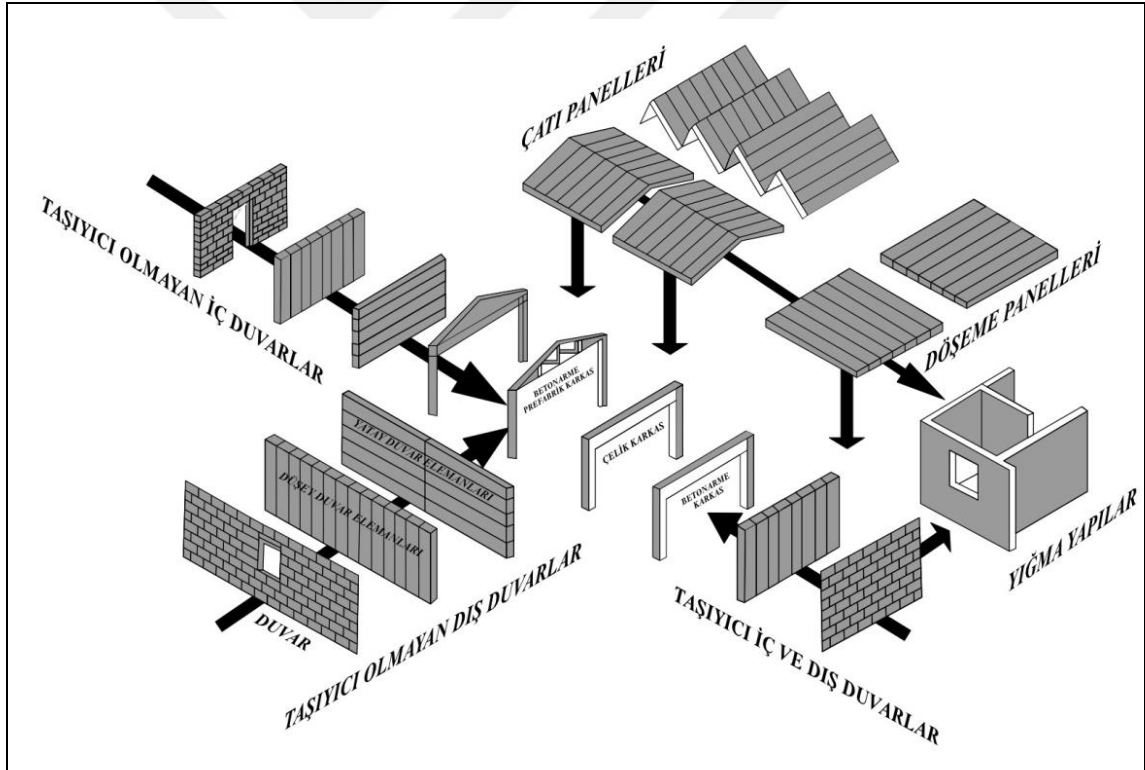
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Isı İletkenlik Değeri (W/mK)
300	0,08
400	0,09
500	0,12
600	0,14
700	0,16
800	0,19

2.4 Gaz Beton Sınıflandırması ve Türleri

Duvar blokları, yapılarda ve betonarme sistemlerde duvar imalatında kullanılmaktadır ve ince bir sıva tabakası ile kaplanırlar. Düz ve geçmeli duvar bloklar olarak iki gruba ayrılır. Asmolen bloklar, yüksek dış yüksekliğinde, dolgulu dişli döşemeler ve ortalama ısı geçirgenlik direnci yüksek dişli döşemelerin oluşturulmasında kullanılmaktadır. U bloklar, duvarların içinde olması gereken, betonarme hatıl, kolon veya kirişlerin üretilmesinde ahşap kalıp yerine tercih edilmektedir. Özellikle yığma yapıların duvar üst betonarme hatlarının üretiminde kullanıldığında, dış ve iç duvar yüzeylerinde homojen bir yüzey oluşumu sağlanmaktadır. Yüksek duvarlarda, yağmur iniş borularının gizlenmesinde, çatı kalkan duvarlarında, baca üretiminde, yangın duvarları yapımında betonarme yapılarda; yalıtım plakaları, ısı yalıtımı yetersiz kalan, eski veya yeni dış duvarların ısı yalıtımında, ısı köprülerinin ortadan kaldırılmasında, taban yüzeylerin yalıtılmasında kullanılmaktadır [20].

Taşıyıcı olmayan gaz beton elemanlar dört bölümden oluşur. Bunlar; düşey duvar, bölme duvar, yatay duvar, kapı-pencere lentolarıdır. Lento, kapı, pencere gibi duvarda boşluk bırakılan uygulamalarda, doğramanın üstüne yatay olarak uygulanan, duvarın devamlılığını ve altındaki doğramanın taşıyıcılığını sağlamaya yarayan gaz beton elemanlardır. Kalıp, demir vb. imalatlar beklenmeden duvar örümü sırasında kolaylıkla yerine yerleştirilir, zaman tasarrufu sağlar. Lento, gaz beton blokların tamamlayıcı ürünüdür ve boyutları blok ölçüleri ile uyumludur.

Düsey duvar elemanları, rüzgâr yüküne karşı dayanımlı olması istenen dış duvarlarda, 6 m açıklığa kadar taşıyıcı olmayan iç ve dış duvarlarda, taşıyıcı betonarme veya çelik iskeletin giydirilmesinde, bölme duvar oluşturulmasında, sanayi ve ticari binaların yapılmasında; bölme duvar elemanları, küt veya zıvana (cephe orta kayıt) profili şeklinde üretilmektedir. Yatay duvar elemanları, düşey duvar elemanları ile aynı yerde üretilip aynı şekilde kullanılmaktadır. Kapı-pencere lentoları, kapı ve pencere üzerinde kullanılan her iki tarafta da eşit yükseklikte olan malzemelerdir. Taşıyıcı olan elemanlar da taşıyıcı duvar ve taşıyıcı çatı elemanları olarak ikiye ayrılmaktadır. Taşıyıcı duvar elemanları, en fazla 3 tam kata kadar konut veya büro yapılarında, taşıyıcı çatı ve döşeme elemanları, dinamik yüklerin etkilemediği döşemelerde, sanayi ve ticaret yapılarının sıcak ve soğuk düz çatı uygulamalarında kullanılmaktadır. Şekil 2.5 de gaz beton ürünlerinin kullanım yerleri görülmektedir [26].



Şekil 2.5 : Gaz beton ürünlerinin yapıda kullanımı [26].

2.5 Gaz Beton Ham Maddeleri

Gaz beton üretiminde kullanılan temel ham maddeler silis kumu, kireç tozu, alçı taşı, çimento ve alüminyum tozudur. Son yıllarda uçucu kül, silis dumanı, demir cürufu, maden atıkları gibi malzemeler ve endüstriyel yan ürünler ile oluşan hafif betonların hazırlanması;

doğal ham maddelerin korunumu, atık malzemelerin geri dönüşümü ve enerji korunumu açısından daha fazla dikkat çekmektedir [25].

Kuarsit

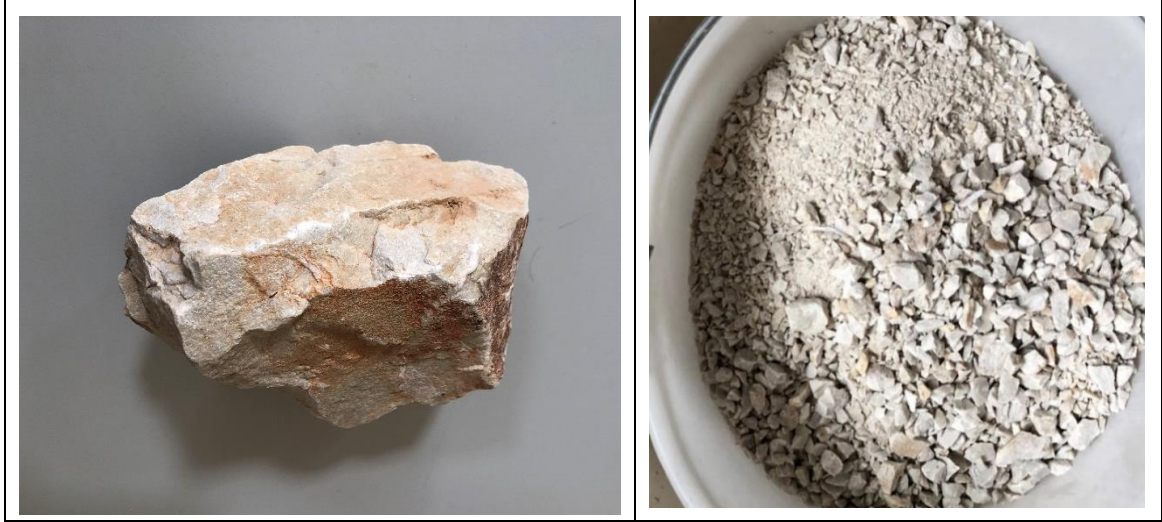
Bünyesinde %95 den fazla kuvars tanesi bulunduran, silis çimentolu kumtaşlarına kuvarsit adı verilir. Aynı zamanda kuvarsit terimi, hidrotermal çözeltilerle silisleşmiş kumtaşları veya metamorfizma ile birbirine kenetlenmiş kuvars kumları içinde kullanılmaktadır [34].

Gaz betonu oluşturan ana ham maddelerden biri olan kuvarsit, sedimanter ve metamorfik olmak üzere iki çeşittir. Magmatik kayaç veya kumtaşı içindeki kuvarslar ekonomik değere sahip değilken fay ve çatlaklarda damarlar şeklinde sekonder olarak oluşmuş kuvars kristalleri veya amorf kuvarslar ekonomik değere sahiptir. Kuvars bozunmaya dayanıklı bir mineral olduğu için kolaylıkla sedimanlarla birlikte taşınabilir sedimanter kayaçlardan, özellikle kumtaşları ve kırıntı yatakları içinde önemli miktarda bulunabilir. Polimorfları kuvars, tridimit ve kristobalittir [35].

Kuarsitin kimyasal bileşimi, kuvars, kumtaşı ve kuvars kumu gibi silisyum dioksit (SiO_2) olup, az miktarda feldispat, mika, manyetit, granat, hematit ve rutil mineralleri ile kil ve kireç taşı eser miktarda bulunabilmektedir. Kuvars kayaç oluşturan en önemli minerallerdendir. Litosferin yaklaşık %12'si SiO_2 dir. Magmatik, sedimanter, metamorfik kayaçların çoğunun ana birleşenidir. Kuvarsit sağlam, sert ve aşındırıcı bir kayaçtır. Bu nedenle çıkarılması, öğütülmesi oldukça güç ve pahalıdır. Bu nedenle kuvarsit üretimi, aynı kimyasal bileşimde olan kuvars kumu, kum taşı ve daha saf olan kuvarstan sonra tercih edilmektedir [36].

Kimyasal birleşimi %46,75 silisyum, %53,25 oksijendir. Kuvarsın mohs sertlik derecesine göre sertliği 7, özgül ağırlığı 2,60- 2,65 g/cm^3 arasındadır. Mor ötesi ışınları geçirir ve rengi beyazdır. Saydam, yarı saydam çeşitleri bulunur. Kuvvetli piezoelektrik ve piroelektriklenme ve mekanik etkiler sonucu elektriklenme göstermektedir. Tanınması; kristal şekilleri, sertliği, konkoidal kırıklığı ve diliniminin olmaması karakteristiktir. Çok düşük genleşme ve asitlere dayanım özelliğine sahiptir. Gaz beton üretiminde kullanılan kuvarsitte, SiO_2 miktarının en az %75,5, Fe miktarının en fazla %2 olması istenir [35].

Şekil 2.6 da gaz betonda kullanılan kuvarsite ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.6 : Gaz beton üretiminde kullanılan kuvarsit.

Kuvarsit cam, gaz beton, silisli briket ve ferrosilika alaşımlarının en önemli ham maddesidir. Kuvarsit mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı yapı taşı, liman, karayolu, demir yolu balastı, kaldırım taşı, bordür taşı, bileme ve öğütme taşı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca betonlarda agrega olarak refrakter tuğlalarda dolgu malzemesi, beyaz porselen yapımında, porselen, seramik, cam sırlanmasında, mekanik temizleyici, boya ve aşındırıcı toz olarak da tüketilmektedir [34].

Çimento

Çimento, kalker ve kilin birlikte yüksek sıcaklıkta sinterlenmesinden sonra elde edilen klinkerin belirli miktarda alçı taşı ile öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır. Çimento, su ile reaksiyona girerek sertleşen bir yapı malzemesidir. Gaz beton üretilirken genellikle normal portland çimentosu (CEM I 42,5R) tercih edilmektedir. Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3100-3150 kg/m³ arasındadır.

Kullanılan çimentoda blaine değeri min 2800 cm²/g, tane boyutu 90 mikron olmalıdır. Çimento ve suyun birleştiği andan itibaren hidrasyon olarak adlandırılan kimyasal reaksiyonlar başlamaktadır. Yumuşak ve plastik bir halde olan çimento hamuru zaman ilerledikçe katılaşp sertleşmektedir.

Çimento hamurunun içindeki su ile çimento arasındaki kimyasal reaksiyonlar uygun sıcaklık ve nemlilik ortamı sağlandığı sürece devam etmekte, kazanılan dayanım miktarında artma olmaktadır. Portland çimentosu, kür işlemi sırasında otoklavda 190 °C sıcaklıkta bağlayıcı ve sertleştirici rol oynamaktadır. Çimentonun esas bileşenlerini oluşturan C₂S ve C₃S, gaz

betona yüksek basınç dayanımı kazandırdığından bu bileşenlerin toplam miktarı %70 den fazla olmalıdır [27,37].

Şekil 2.7 de gaz betonda kullanılan çimentoya ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.7 : Gaz beton üretiminde kullanılan çimento.

Alçı taşı

Alçı taşı (jips) doğal olarak oluşan ve bileşiminde iki molekül su bulunduran yumuşak bir kalsiyum sülfat mineralidir. Kimyasal formülü $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dir. Özgül ağırlığı 2,32, mohs sertliği 2 dir. Ayırıcı özellikleri, dilinimi ve düşük sertliğidir. Kalkerden daha sert ve asitlere karşı dayanıklıdır. Gaz beton bünyesine alçı taşı eklenmesinin amacı çimentonun priz süresini ayarlamaktır. Alçı taşı, gaz betonun basınç dayanımını arttırmakta, karışımdaki kirecin sönme hızını ayarlamakta, rötre (büzülme) özelliğini iyileştirmekte ve donu karşı dayanıklılığı yükseltmektedir [37].

Alçı, yaygın olarak çıkarıldığı için piyasadan kolaylıkla temin edilebilmekte ve toz halinde kullanılmaktadır. Bunkerlerde depolanan alçının kalitesi, gaz betonun kalitesini doğrudan etkilemektedir [8].

Şekil 2.8 de gaz betonda kullanılan alçı taşına ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.8 : Gaz beton üretiminde kullanılan alçı taşı.

Kireç

Kirecin ana maddesi kalsiyum oksittir (CaO). Kireç taşı denilen kalsiyum karbonat (CaCO₃) 850-900 °C de bir süre bekletildiğinde bünyesindeki karbondioksit (CO₂) uçar ve geriye kalsiyum oksit (CaO) kalır. Kalsiyum oksit yoğunluğu 3,02-3,30 arasındadır. Kireç tozu, gaz beton üretiminde toz halinde tedarik edilerek ya da kireç taşını kırıp, rafine toz haline dönüştürülerek sağlanır. Kireç, gaz beton üretiminin kimyasal enerji kaynağıdır. Alüminyum tozu ile reaksiyona girerek gaz kabarcıklarının oluşumunu sağlamaktadır. Silisyum ve su ile sertleşme sırasında kalsiyum silikat hidrat (CSH) oluşturması nedeniyle çok önemli gaz beton ham maddelerinden biridir. Gaz beton üretiminde parça veya toz kireç kullanılmaktadır. Kireçte olması gereken özellikler CaO minimum %80, MgO en çok %2, tane boyutu ise 90 mikron olmalıdır. Kireç kullanım için beklerken çelik bunkerlerde depolanmaktadır. Kireçler betonda kalsiyum oksit (CaO) halinde kullanılmazlar [8].

Gaz betonun ham maddesi olan kireç, kireç taşlarının 900 °C de fırınlanması ile elde edilmektedir. Bu işleme ait kimyasal reaksiyon Eşitlik 2.5 te verilmiştir.



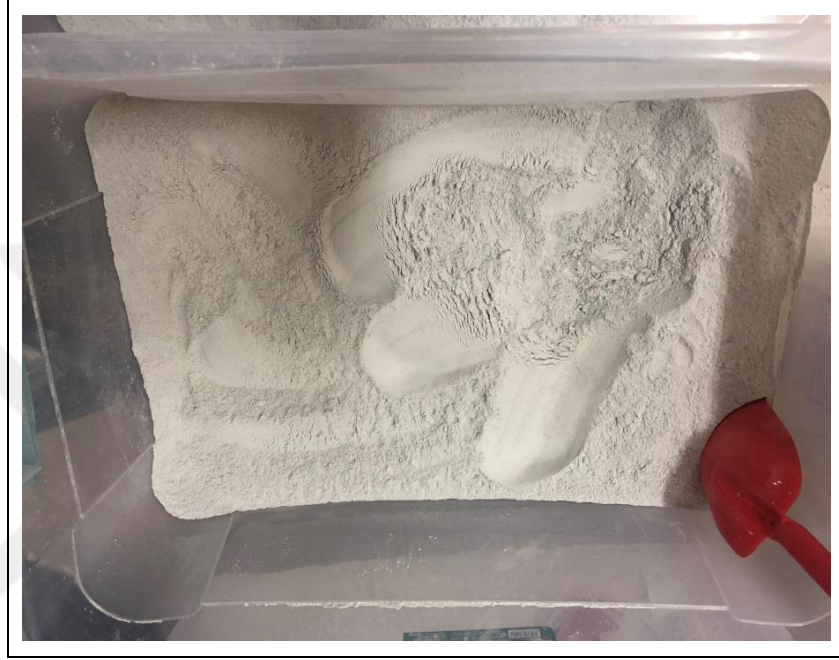
Oluşan CaO sönmemiş kireç olarak isimlendirilir. Su ile işlem gördüğünde hidrasyon olayı sonucu sönmüş kirece dönüşür. Sönmemiş kireç ile su arasındaki reaksiyon Eşitlik 2.6 da verilmiştir.



şeklinde gelişir. Bu reaksiyonda meydana gelen sıcaklık 400 °C veya daha yüksek değerlere çıkabilir [8].

Kireç, kür işlemleri sırasında su ile reaksiyona girerek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i meydana getirmektedir. Kirecin sönmesi esnasında açığa çıkan ısı sertleşmeyi hızlandırmaktadır. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, SiO_2 ile reaksiyona girerek, gaz betonun temel iskeletini oluşturan hidrate silikat bileşiklerini oluşturmaktadır [37].

Şekil 2.9 da gaz betonda kullanılan kirece ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.9 : Gaz beton üretiminde kullanılan kireç.

Alüminyum tozu

Alüminyum periyodik cetvelin 3A grubunda bulunmaktadır. Atom numarası 13, atom ağırlığı 26,89'dur. +3 değerlikli bir element olan alüminyumun 20 °C'deki yoğunluğu 2700 kg/m³, erime noktası 659,8 °C, kaynama noktası 2450 °C, ısınma ısısı 0,224 Cal/g (1000 °C), erime ısısı 400 Cal/g, 20 °C'deki elektriksel iletkenliği bakırın %65'i, ısı iletkenliği 0,5, ışık yansıtılabilirliği %90 olup, bu özellikler alaşım elementleri katılarak önemli ölçüde değiştirilebilmektedir. Alüminyum doğada bileşikler halinde bulunmaktadır [8].

Yerkabuğunda yaklaşık olarak %8 oranında bulunan alüminyum, oksijen ve silisyumdan sonra doğada en çok bulunan üçüncü elementtir. Günümüzde cevherden ve hurdadan olmak üzere iki tür alüminyum üretimi vardır. Alüminyum metali, boksit cevherinden elde edilmektedir. Hafiflik ve yüksek dayanım özellikleri gerektiren taşımacılık ve inşaat sektörlerinde kullanılır.

Alüminyum gaz betonun en önemli ham maddelerinden biri olup, gaz beton üretiminde saf halde kullanılmaktadır. Gaz betonda sulu emülsiyon halinde kullanılan alüminyum tozu, su ve kireç ile reaksiyona girerek hidrojen (H₂) gazı oluşmasına neden olmakta, gaz betonun gözenekli ve kabarmış kek yapısı kazanmasını sağlamaktadır [8].

Şekil 2.10 da gaz betonda kullanılan alüminyum tozuna ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.10 : Gaz beton üretiminde kullanılan alüminyum tozu.

2.6 Gaz Beton Üretimi

Gaz beton üretimi kilden yapılan duvar ürünleri veya ön gerilmeli betonun üretimine, gaz betonda kullanılan ham maddelerin yapısal bileşenleri de normal beton bileşenlerine benzemektedir. Gaz beton üretim süreci beş bölümde incelenebilir [38].

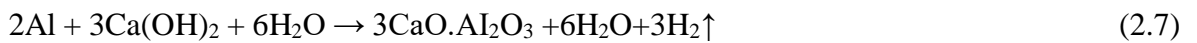
- a) Birleştirme ve ham maddelerin karıştırılması
- b) Kabarma sağlayacak katkı maddesi eklenmesi
- c) Kabarma, biçimlendirme, ön kür, kesme ve ebatlama işlemi
- d) Otoklav kullanarak son kürleme işlemi
- e) Paketleme ve taşıma işlemi

İçerisinde kuvars kumu veya kuvarsit, alçı taşı, kireç, çimento, alüminyum tozu ve su olan gaz beton endüstriyel metodlarla üretilmektedir. Gaz betonun içerisinde hacimce %15-30 oranında çimento, %0,05-0,10 alüminyum tozu, %70-85 oranında kum-kireç ve su

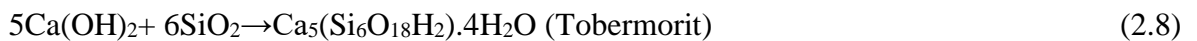
bulunmaktadır. Kuvars, alçı taşı, bağlayıcı olarak kullanılan portland çimentosu, kireç ile alüminyum tozu ve suyun birleştirilmesi ile bir karışım elde edilmektedir. Karışım homojenlik sağlanana kadar karıştırılıp, alüminyum tozu da ilave edildikten sonra kalıplara dökülmektedir. Karışım daha sonra kabarmaya başlamakta ve döküm işlemi yapıldıktan 2-3 saat sonra sertleşmektedir. Eğer donatılı bir yapı elemanı üretilecekse, önceden hazırlanıp, çekilmiş ve kaynaklanarak hasır haline getirilmiş donatılar, korozyona karşı korunması için su bazlı bitüm esaslı malzeme ile kaplanıp, çelik kalıplara düzgünce yerleştirilmektedir. Bu esnada kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmekte ve reaksiyon sonunda trikalsiyum hidrat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{H}_2\text{O}$) ve hidrojen (H_2) gazı oluşmaktadır. İki-üç saatlik sertleşme işleminden sonra gaz beton elemanlarına kesim işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Kesim işleminden sonra ebatlanan gaz beton elemanlar otoklavlarda, yaklaşık 10-12 saat, maksimum 12 bar basınç altında ve yaklaşık $190\text{ }^\circ\text{C}$ de doymuş buhar ile kürlenerek sertleştirilmesi sağlanmaktadır [2,11,17].

Bünyesi hava kabarcıkları ile hafifletilmiş olan gaz beton, 0,5 ile 1,5 mm arası yuvarlak birbirleri ile bağlantısı olmayan hava gözeneklerinden oluşmaktadır. 400 kg/m^3 kuru birim hacim ağırlığındaki gaz beton malzemedeki gözenek hacmi yaklaşık %84, katı madde hacmi %16 oranındadır. Bu özelliği gaz betona düşük ısı iletkenliği kazandırmaktadır. Katı madde miktarı, gözenek oranı, birim hacim ağırlığı ve dayanımı etkilemektedir. Üretim sırasında bu oran kabartıcı ajan miktarı ile ayarlanmaktadır. Buhar kürü sonucu malzeme hacim sabitliğine ulaşmış olarak ortaya çıkmaktadır. Gözeneklerin arasında irtibat kanallarının olmaması kapiler su emmenin az olmasını sağlamaktadır. Yüzeyde gözlenen su emme, kesim yüzeylerinde gözenekli yapının kesim sırasında tahrip olmasından dolayı yüzeysel su emmedir ve malzeme iç kesimlerine, su nüfus etmemektedir. Gözenekli betonlar genellikle; serbest drenajın gerekli olduğu veya daha az kütle ve ısı geçirgenliğinin gerektiği yapılarda kullanılmaktadır [18].

Gaz betonun geçirdiği kimyasal reaksiyonlar Eşitlik 2.7 ve 2.8 de verilmiştir [39,40].



(Alüminyum Tozu + Kireç + Su \rightarrow Trikalsiyum Hidrat + Hidrojen)



Birleşim sonucu oluşan hidrojen gazı karışımdan yukarı doğru hareket ederken yerini hava almakta, bu süreçte daha hafif bir gaz olan hidrojen yükselerek kendisinden daha yoğun olan hava ile yer değiştirmektedir. Kabarmayı sağlayıcı alüminyum tozu karışıma eklenerek

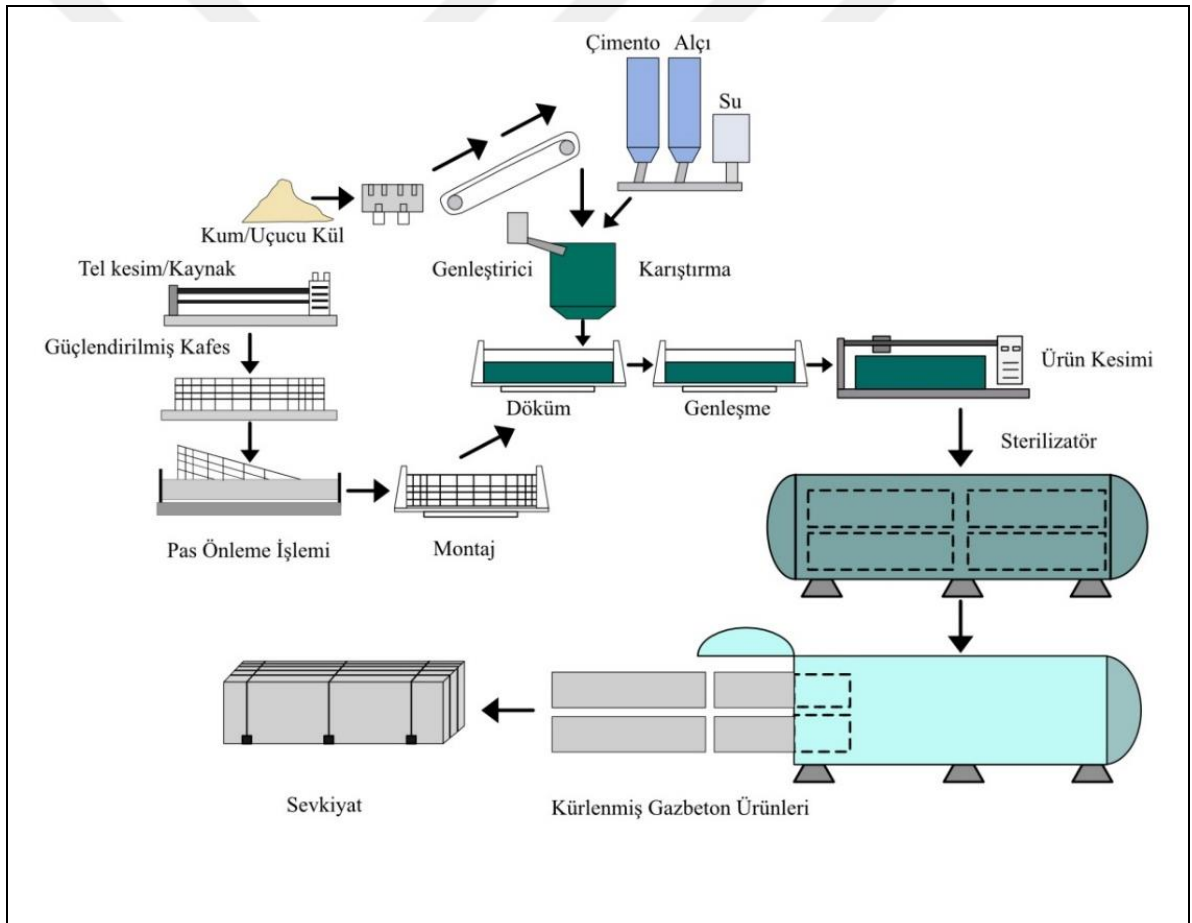
homojen bir karışım oluşturulmaktadır. Amaç, hidrojen kabarcıklarının oluşması sonucu normal hacminin yaklaşık 2-5 katı arasında genişleyerek malzemenin her tarafında eşit hacim artışı sağlanmasıdır. Bu hacim artışı karışıma eklenen kirece ve alüminyum tozuna bağlıdır [38].

Hazırlanan malzeme son işlem olan otoklavda son dayanımına ve hacim sabitliğine ulaşmış olur. Dayanım kazanan gaz betonun otoklavda oluşan reaksiyonları Eşitlik 2.9 da verildiği şekildedir [17].



Kireç + Silika + Su → Monokalsiyum Silikat Hidrat

Gaz betonun üretim şeması Şekil 2.11 de verilmiştir.



Şekil 2.11 : Gaz beton üretim şeması [37].

2.7 Gaz Beton Üretiminde Atıkların Kullanımı

Günümüzde artan nüfus ve sanayi faaliyetlerine bağlı olarak doğal kaynakların tüketimi ile atık miktarları ciddi bir şekilde artış göstermiştir. Üretim sonrası oluşan atıkların taşınması,

depolanması, bertaraf edilmesi işletmeler için önemli maliyetler teşkil etmektedir. İri boyutlu atıklar, inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılırken, toz atıklar ise farklı endüstri kollarında kullanım olanağı bulabilmektedir.

Gaz betonun üretiminde kullanılan geleneksel ham maddeler yerine endüstriyel atıkların kullanılabilirliği birçok araştırmacı tarafından incelenen bir konudur. Bu bağlamda uçucu kül, cüruf, kurşun çinko atıkları, demir cevheri atıkları ve kum-fosfor cürufu-kireç atıklarının gaz betonda kullanılabilirliği araştırılmıştır [41].

Çimentonun hidratasyonu ve sertleşme işlemi betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Gaz beton üretilirken puzolanik katkıların kullanılması önemli bir yere sahiptir. Bu puzolanik katkıları SiO_2 içeren, doğal kayalar (diatomit), küller, cüruf ve diğer amorflardır. Hidratasyon işlemi sırasında kireç ile SiO_2 reaksiyona girerek jel kalsiyum hidrosilikatlarla birlikte hidro alüminatlar ve diğer hidratlar meydana gelmektedir. Çevreyi korumak ve geri dönüşüm için ince agrega olarak endüstriyel atık olan cam atık tozları da kullanılmıştır [42].

Cam Atığı

Camlar günlük yaşamda, pencere, şişe, dekorasyon, ışın tüpleri ve ampul yapımı gibi birçok alanda kullanılabilir. Bu ürünlerin atıkları çimento üretiminde, cam agrega veya filler malzeme gibi, çimento yerine puzolanik katkı olarak geri kazanılabilir. Böylece atık camların %18,46 sı geri kazanılabilir.

Cam tozu, çimento hidratasyonu süresince serbest durumdaki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek betonun dayanımının gelişiminde etkili olmaktadır. Ayrıca cam tozunun tane boyutu çok küçük olduğundan agrega ve çimento ara yüzeyinde puzolanik aktiviteye ek olarak filler etkisi gerçekleştirerek daha yoğun bir agrega-bağlayıcı ara yüzeyi meydana getirmektedir [43].

Şekil 2.12 de gaz beton üretiminde kullanılan cam atıklara ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.12 : Gaz beton üretimde kullanılan cam atıklar.

Mermer Atığı

Mermer ülkemizde her bölgede bulunan doğal taş zenginliklerimizdendir. Dünyada doğal taş pazarında 10 milyon ton/yıllık mermer üretimi gerçekleşmektedir. Mermer üretim sürecinde toz atıkların yanısıra parça atıklarda oluşmaktadır. Mermer işlenirken yaklaşık %25-40 oranında toz atık meydana gelmektedir. Parça artıklar, uygun yerlerde stoklanmakta ve talep olduğunda satılmakta, toz artıklar ise üretimde kullanılan su ile birlikte çamur haline gelmekte, bu çamur, arıtma tesislerinde su ve toz parçacıkları olarak birbirinden ayrılmaktadır. Tozlar, içerisindeki suyun uzaklaştırılmasıyla kek haline gelmektedir. Büyük miktarlarda oluşan bu atıkların geri kazanımı ve yeniden kullanımı hem çevrenin hem de doğal kaynakların korunması açısından oldukça önemlidir [20].

Mermer atıklarının betonda agrega olarak kullanıldığı araştırmalarda, mermer toz atığının ince malzeme olarak mekanik özellikleri olumlu etkilediği görülmektedir.

Mermer tozu atıklarının; inşaat sektöründe mozaik, harç, sıva, karo vb. üretiminde, seramik sanayinde sır üretiminde, çimento sanayinde beyaz çimento yapımında, kâğıt, tarım, gübre, yem ve diğer bazı sanayi sektörlerinde katkı malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir. Buna rağmen atık miktarının düşük oranlarda olması, atık sahalarında büyük yığınlar oluşmasına sebep olmaktadır [44].

Mermer tozunun kullanılabilir olduğu sektörlerden biri de hazır beton sektörüdür. Mermer tozunun gerek ince agrega gerekse çimento yerine ikame edilerek kullanılabilirliği, dayanım ve dayanıklılığı ile ilgili araştırmalar geçmişten günümüze halen devam etmektedir [45].

Atık mermer tozlarının belirli oranlarda beton karışımına ilave edilmesinin, beton basınç dayanımına, ultra ses hızı ve su emme özelliklerine olumlu etkiler sağladığı bilinmektedir [46].

Şekil 2.13 de gaz beton üretiminde kullanılan mermer atığına ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.13 : Gaz beton üretiminde kullanılan mermer atıklar.

Seramik Atığı

Seramikler sert ve gevrek özellikli, sırlı veya sırsız olarak pişirildikten sonra kullanılan malzemelerdir. Basınç mukavemeti oldukça yüksek çekme mukavemetleri düşüktür. Seramik malzemeler, sırlı veya sırsız pişirildikten sonra kullanılabilen malzemelerdir. Seramik üreten işletmeler üretim sırasında veya sonrasında ürünlerde kırılma ve çatlama sonucu belirli bir miktarda atıklar meydana getirmektedirler.

Pişmiş atıkların seramik sektöründe geri dönüşümü tüketim sonrası ve öncesi olmak üzere iki çeşittir. Geri dönüşüm seramik atığın sonraki kullanımı için üretilecek malzemenin kalitesini ve yapısını bozmadan onu yeniden kullanmaktır. Diğer bir tanım ise seramik atıkların daha nitelikli veya daha iyi yeni malzemelere dönüştürülme sürecidir. Seramik üretiminde pişmiş atıkların kırılarak tekrar malzeme içinde kullanılması geri dönüşüm uygulamalarından biridir. Seramik sektöründe üretim sonrası en az %5 oranında atık oluşumu gerçekleşirken, ülkemizde yaklaşık %8-13 oranında atık oluşmaktadır. Dünyada yaklaşık 550 milyon m² kadar seramik atık ortaya çıkmaktadır. İngiltere'nin önde gelen seramik firması Johnson Seramik her yıl hasarlı 20 bin ton seramik porselen atıklarını yeniden kullanarak %25-35 oranında geri dönüşüm ile ürünler üretmektedir [47].

Şekil 2.14 de gaz beton üretiminde kullanılan seramik atığına ait görüntü verilmiştir.



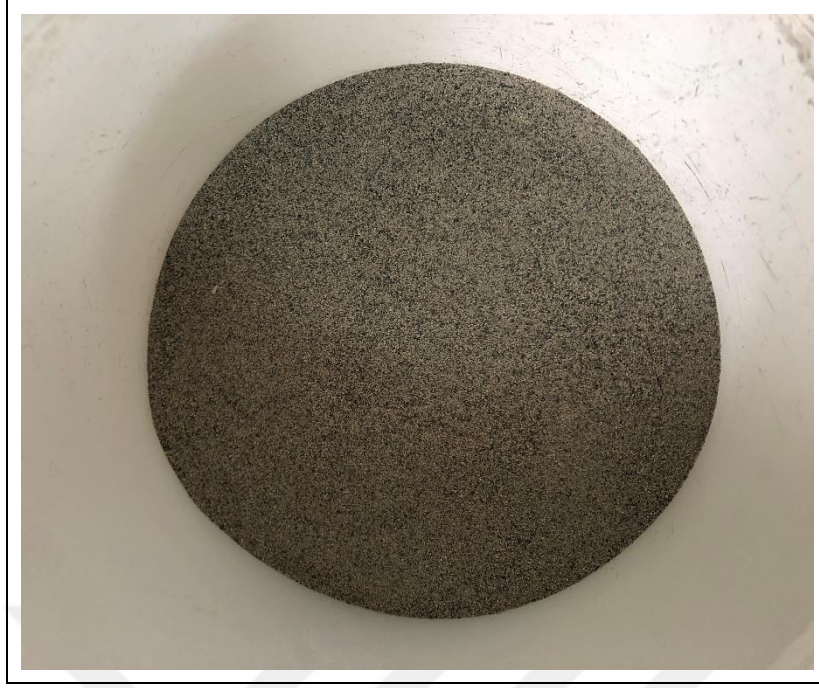
Şekil 2.14 : Gaz beton üretimde kullanılan seramik atıklar.

Granit Atığı

Granit, sert, kristal yapıli minerallerden oluşun, tane görünümlü magmatik bir kayaç türüdür. Doğaltaş sektörü üretim ve işleme sonucunda önemli miktarlarda atık meydana getirir. Granit atıklar, topografya değişikliği, yüzey/yeraltı sularında bozulma, hava/görüntü kirliliği vb. çeşitli çevresel problemler oluşturmaktadır.

Üretim esnasında oluşun ve büyük miktarlara ulaşun atıklar, fabrika yakınlarındaki atık sahalarında depolanmakta ve ciddi çevre ve sağlık tehditleri oluşturmaktadır. Bu nedenle betonda ince agrega olarak kullanımları denenmektedir. Granit işlenirken ortaya çıkan ince granit toz parçaları, su ile birlikte kolloidal bir atık oluşturur. İnce granit parçacıkları toprağın üst tabakasının geçirgenliğini ve gözenekliliğini azaltmakta, su birikmesine sebep olmaktadır. Rüzgâr ile taşınan granit toz parçaları işleme çevresinde ekolojiyi ciddi bir şekilde tehdit ederek bitki örtüsüne yerleşmekte ve bu toz parçacıkları sağlığı da tehdit etmektedir. Ciddi bir çevresel kirleticisi ve insan sağlığı için potansiyel bir tehdit olan bu atığın uygun bir şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Son yıllarda inşaat sektörü bu istenmeyen atıklar için umut verici bir saha olmuştur [48].

Şekil 2.15 te gaz beton üretiminde kullanılan granit atığına ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.15 : Gaz beton üretimde kullanılan granit atıklar.

2.8 İstatistiksel Yöntemler

İstatistik hemen hemen tüm bilim dalları ile ilgili araştırmalarda yer almaktadır. Bazı araştırmalarda yer alan birden fazla değişken arasındaki ilişkinin incelenmesi, bu inceleme sonucunda değişkenler arasındaki ilişkinin yönü, kuvveti, yapısı ile ilgili karar verilmesi veya alınacak kararlarda bu sonuçlarında dikkate alınması gerekebilir. Değişkenler arasındaki ilişkinin incelenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biri de korelasyon analizidir.

2.8.1 Korelasyon

Korelasyonun kelime anlamı ilişki, bağlantıdır. Korelasyon ile birlikte, değişim gösteren iki ya da daha fazla değişkenin aralarındaki ilişki incelenir. Bu ifadeye göre korelasyon iki değişken arasında olabileceği gibi ikiden fazla değişken arasında da olabilir. İki değişken arasındaki korelasyon doğrusal olabileceği gibi eğrisel de olabilir. İkiden fazla değişken arasındaki korelasyon ise çoklu korelasyon adı ile nitelendirilir. Değişkenlerden biri bağımsız değişken (X), diğeri ise bağımlı değişken (Y) dir.

İlişkinin yönü, yani ters veya doğru yönlü olduğu ve ilişkinin kuvveti korelasyon katsayısı adı verilen bir katsayı ile belirlenir. Korelasyon katsayısı daima +1 ile -1 arasındadır. Katsayının sıfır (0) çıkması değişkenler arasında ilişkinin olmadığını gösterir. Eğer serilerde değişme (birlikte değişme) aynı yönde ise katsayı pozitif (+) çıkar birlikte değişme ters

yönde ise yani değişkenlerin biri artarken diğeri azalıyorsa katsayı negatif (-) çıkar. Korelasyon katsayısının pozitif çıkması değişkenler arasındaki ilişkinin doğru yönde olduğunu negatif çıkması ise ilişkinin ters yönde olduğunu gösterir. Aralarında ilişki olmayan seriler için korelasyon katsayısı hesap edilmemelidir. Çünkü sonuç sıfır (0) çıkacaktır.

Standart sapma ve aritmetik ortalama iyi bilindiği takdirde korelasyon katsayısını bulmak kolaylaşır. Katsayıyı hesaplama da kullanılan çok çeşitli formüller vardır. Bunlardan birisi Pearson korelasyon katsayısı formülüdür. Korelasyon katsayısını hesaplamadan önce kovaryansı hesaplamak gereklidir. Korelasyon katsayısı kovaryansın standartlaştırılmış halidir. Kovaryans değerinin büyüklüğü iki değişken arasındaki korelasyonun şiddetini gösterir. Eğer kovaryans küçük ise iki değişken arasındaki ilişki de az olacaktır. Kovaryansın işareti, korelasyon katsayısının işareti ile aynı olur. Korelasyon katsayısının önündeki işaret, değişkenler arasındaki ilişkinin hangi yönde olduğunu gösterir [49,50].

X ve Y arasında hesaplanan korelasyon katsayısı (ρ);

$\rho < 0$ ise, *negatif* (ters yönlü) ilişki,

$\rho > 0$ ise, *pozitif* (doğru yönlü) ilişki,

olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

2.8.2 Yapay sinir ağları

Yapay sinir ağları (YSA)'nın; doğrusal olmayan yapıları modelleyebilmesi, paralel dağılmış yapısı, öğrenme ve genelleme yapma yeteneği, farklı problemler için uyarlanabilirliği, hata toleransına sahip olması en önemli özelliklerindedir. YSA bu özellikleri ile finans, işletme, mühendislik, tıp vb. birçok farklı alanda uygulanan bir yöntemdir. YSA'yı meydana getiren YSH (yapay sinir hücresi) için tercih edilen aktivasyon fonksiyonu sayesinde YSA'nın doğrusal ya da doğrusal olmayan modellemeyi gerçekleştirmesi sağlanmaktadır. Günlük yaşamda karşılaşılan birçok problemin doğrusal olmayan ilişkiler içerdiği düşünüldüğünde YSA'nın bu özelliğinin önemi anlaşılmaktadır. İnsan sinir sisteminin çalışmasını taklit eden YSA, eldeki probleme ilişkin verileri kullanarak veri yapısında saklı ilişkileri ortaya çıkarmaya çalışır. Bu işlem ağın öğrenmesi olarak adlandırılır. Öğrenme işlemi esnasında YSA'yı meydana getiren YSH'leri arasındaki bağlantıların ağırlıklarının belirlenmesi işlemidir. YSA'nın öğrenme işlemi gerçekleşirken kendisine tanıtılan verilerden farklı olarak yeni veriler içinde anlamlı sonuçlar üretebilmesine genelleştirme

yeteneği denir. Genelleştirme yeteneği olmayan bir YSA'nın anlamlı olmayacağı açıktır. Tahmin, örüntü tanıma, sinyal işlem gibi birçok alanda YSA'nın genelleştirme yeteneğinin sonucu olarak başarı elde edilmektedir [51].

YSA insan zekâsının yeteneklerinden öğrenmeyi modelleyerek öğrenme yeteneği ile tahmin edebilme, yeni bilgi çıkartımı yapabilme gibi becerileri makinelere kazandırmayı amaçlayan yapay zeka yöntemidir. Matematik problemlerini çözmeye yarayan yetenekleri, herhangi bir yardım olmadan otomatik olarak gerçekleştirebilmek amacı ile geliştirilen bilgisayar sistemleridir. Doğrusal olmayan niteliğe sahipliği, öğrenme yeteneği, genelleme becerisi, adaptasyon yeteneği, parazit veriye karşı tolerans miktarı, donanımsal gerçekleşimi, paket yazılımlar ile destek alınabilmesi, YSA'nın örnek kullanım alanları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Uzay: Uçuş simülasyonları, otomatik pilot uygulamaları

Otomotiv: Otomatik yol izleme, rehber, garanti aktivite analizi, yol koşullarına göre sürüş

Bankacılık: Kredi uygulamaları, müşteri analizi ve kredi müracaat değerlendirilmesi

Savunma: Hedef seçme, radar, sensör sonar sistemleri

Elektronik: ip bozulma analizi, non-linear modelleme

Eğlence: Animasyonlar, özel efektler

Üretim: Üretim işlem kontrolü, ürün dizaynı, makine yıpranmalarının tespiti, dayanıklılık analizi, kalite kontrolü

Robotik: Yörünge kontrol, forklift robotları, görsel sistemler, uzaktan kumandalı sistemler, optimum rota belirleme

Telekomünikasyon: Görüntü ve data karşılaştırma, filtreleme, ses ve görüntü işleme, trafik yoğunluğunun kontrolü ve anahtarlama

Güvenlik: Parmak izi tanıma, kredi kartı hileleri saptama, retina tarama, yüz eşleştirme

YSA sayısal veriler ile hesaplama yapma bilgileri saklama sisteme sunulan örnekleri kullanarak problemi öğrenebilme ve bununla daha önce karşısına çıkmayan durumlara çözüm bulabilme özelliklerine sahiptir. Genellikle YSA uygulamaları tahmin, sınıflandırma, veri ilişkilendirme, veri yorumlama ve veri filtreleme problemlerinde kullanılmaktadır. YSA ile tahmin yapılması istenen sistem için modeli sunulan girdi değerlerine karşılık, çıktı değerlerinin kestirilmesi hedeflenmektedir.

YSA uygulanan ağ modeline göre farklı özelliklere sahip olmasına karşın, diğer YSA'lar ile ortak birkaç özelliğe de sahiptir YSA'nın öğrenme yeteneğine sahip olması en güçlü özelliğidir. Sakıncası ise sistemin çalışmasını analiz edememesi ve sistemin öğrenmesinde başarısız olma ihtimalidir. Avantajları ise;

1- YSA hücrelerden oluşur. Hücrelerin eş zamanlı çalışması ile karmaşık işlemler yapılmaktadır. İşlem sürerken hücrelerden herhangi birinde sorun olsa dahi sistem çalışmasına güvenli bir şekilde devam edebilir.

2- Kullanılan sayısal bilgiler vasıtası ile problemin genel özellikleri elde edilir. Böylelikle eğitim sırasında sisteme verilen örnekler dışındaki verilere de anlamlı yanıtlar üretilebilir.

3- Sistem mimarisinde dağılmış olan doğrusal olmayan alt birimler, doğrusal olmayan problemlerin de çözümüne olanak sağlar.

4- YSA'lar makine öğrenmesi gerçekleştirebilir. Problemi öğrenerek benzer durumlar karşısında mantıklı kararlar verebilir.

5- YSA'ların bilgi işlemesi geleneksel programlama mantığından farklıdır. Bundan ötürü geleneksel programlamaya ait olan olumsuzlukları barındırmaz.

6- Bilgiler ağın tamamında saklanır. Geleneksel programlamadaki gibi bilgiler veri tabanlarında değil; ağın tamamına yayılarak bağlantılarda depolanır. Hücrelerden işlevini kaybeden olması durumunda anlamlı bilginin kaybolmasına sebep olmaz.

7- Bellek dağımık haldedir. Hücrenin bağlantı ve ağırlık değerleri, ağın bilgisini göstermektedir. Bundan dolayı tek bir bağlantı yalnız başına anlamlı değildir.

8- Öğrenme işlemi örnekler kullanılarak yapılır. YSA'nın problemi öğrenebilmesi için uygun örneklerin belirlenmesi; belirlenen örnekler ağa gösterilerek istenen çıktılara göre ağın eğitilmesi gerekmektedir. Bu yüzden ağın başarılı olması için seçilen örneklerin doğruluğu önemlidir. Ağa problem ile ilgili bütün yönler örnekler ile verilmelidir.

9- YSA eğitim esnasında karşılaşmadığı örnekler dışında daha önce hiç görmediği örnekler hakkında da bilgi üretebilir. Bu yeteneğini eğitim esnasında sisteme verilen örneklerden genelleme yaparak oluşturur.

10- Algılamaya yönelik problemlerde YSA kullanılabilir.

11- Örüntü ilişkilendirme ve sınıflandırma YSA ile yapılabilir. YSA'lar kendisine verilen örneklerin kümelenmesi, diğer örneklerin hangi kümeyle ait olduğuna karar verme ilişkilerini örüntüleri ilişkilendirerek gerçekleştirmektedir.

12- Ağa eksik bilgilere sahip olan örüntüler verildiğinde YSA eksik bilgileri tamamlayarak örüntü tamamlaması yapabilir.

13- YSA çevrim içi olarak öğrenilebilir. Bu sayede kendi kendilerine öğrenebilme ve organize etme yeteneğine sahip olurlar.

14- YSA geleneksel sistemlerin aksine problemi öğrenme işlemi gerçekleştikten sonra eksik veri olsa dahi anlamlı çıktı üretebilir. Bu durum performans kaybı oluşturmaz. Bilgilerin önem dereceleri eğitim sırasında öğrenilir.

15- YSA'ların eksik verilerle çalışabilmesi ve mimarisinde bulunan hücrelerin bozulması durumunda dahi sistemin çalışması YSA'nın hata toleransına sahip olduğunu göstermektedir.

16- YSA'lar ayrı bir matematik modele ihtiyaç duymazlar.

Dezavantajları;

1- YSA'ların en önemli sorunlarından birisi donanım bağımlı olmasıdır. YSA'ların önemli özelliklerinden paralel işlem yapabilme yeteneği, paralel çalışan işlemcilerle bağımlı olarak performans sergilemektedir.

2- YSA oluşturulurken hücre yapısı, öğrenme katsayısı, katman sayısı gibi ağı parametrelerinin ve ağı yapısının belirlenmesi için belirli kurallar yoktur. Uygun olan ağı oluşturulması tecrübe ve deneme yanılma yolu ile belirlenmektedir.

3- YSA için eğitimin ne zaman sonlanacağına ilişkin belirli bir kural yoktur. Eğitimin sonlanması ağı örnekler üzerinde ürettiği çıktıların üzerindeki hatasının belirli bir değerin altına indirilmesine veya belirli sayıda eğitim turuna bağlı olabilmektedir.

4- YSA sayısal bilgiler ile hesaplama yapmaktadır. Bundan dolayı problemler YSA'ya sunulmadan önce örneklerin sayısal değerlere çevrilmesi zorunludur. Bu çevrim için belirlenen yöntem verimliliğini etkilemektedir.

5- Ağı davranışları açıklanamamaktadır. YSA bir probleme çözüm ürettiği zaman bu çözümün nasıl ve neden olduğuna dair bir bilgi vermez.

6- Bazı ağlar haricinde YSA'lar için kararlılık analizi yapılamamaktadır [52].

YSA ileri yapay zeka tekniklerinin en popüler olanlarından biridir. Biyolojik sinir hücrelerinin simüle edilmiş bir modeli olarak tanımlanan YSA, insan beyninin anlama, öğrenme, fikir yürütme gibi yeteneklerini de taklit edebilmektedir [53].

Bir yapay sinir hücresi girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar olmak üzere beş bölümden oluşur. Girdiler (x_1, x_2, \dots, x_n), diğer hücrelerden veya dış ortamlardan hücreye giren bilgilerdir. Ağırlıklar (W_1, W_2, \dots, W_n), girdi kümesi ya da kendinden önceki tabakadaki başka bir işlem elemanının, bu işlem elemanı üzerindeki etkisini ifade eden değerlerdir. Toplama fonksiyonu girdiler ile ağırlıkların tamamının bu işlem elemanı üzerine etkisini hesaplayan bir fonksiyondur. Bu fonksiyon bir hücreye gelen net girdiyi hesaplamaktadır. En sık kullanılan toplama fonksiyonu ağırlıklı toplam fonksiyonudur. Net girdi ağırlıklı toplam fonksiyonu kullanarak aşağıdaki formül Eşitlik 2.10 da verilmiştir [54].

$$NET = \sum_{i=1}^n W_i x_i \quad (2.10)$$

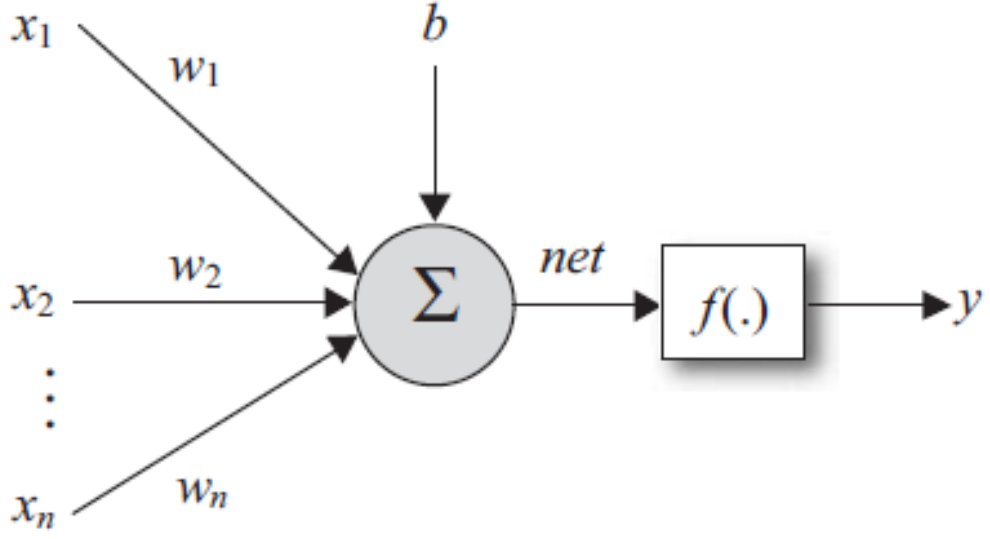
Aktivasyon fonksiyonu $f(NET)$, toplama fonksiyonundan gelen girdiyi işleyerek YSH'nin çıktısına dönüştürmektedir. Bu fonksiyon genellikle doğrusal olmayan yapıdadır. Girdi değerlerini belirli bir seviyenin üstünde tutmak amacıyla bir eşik değeri seçilmektedir. Aktivasyon fonksiyonundan elde edilen değerler YSH'nin çıktısı oluşturmaktadır. Eşik (bias) değeri b_j ile gösterilirse, çıktı fonksiyonu aşağıda Eşitlik 2.11-2.12-2.13 te verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Çıktı} = f(NET) \quad (2.11)$$

$$NET_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} x_i + b_j \quad (2.12)$$

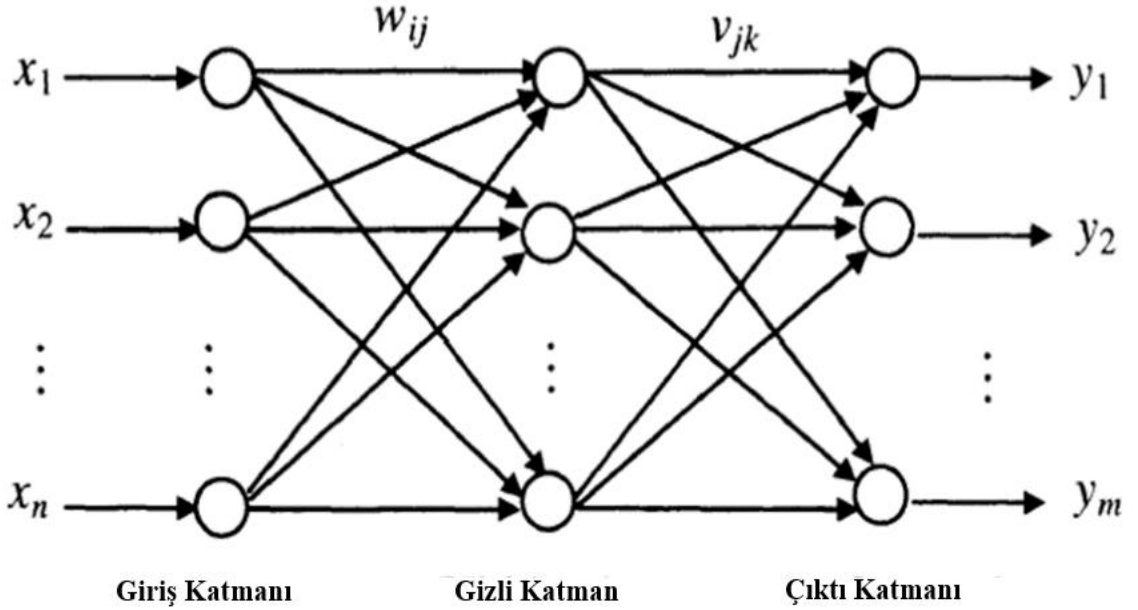
$$\text{Çıktı} = f\left(\sum_{i=1}^n W_{ij} x_i + b_j\right) \quad (2.13)$$

Yapay sinir hücresi yapısı Şekil 2.16 da verilmiştir.



Şekil 2.16 : Yapay sinir hücresinin yapısı [55].

Sinir hücrelerinin bir araya gelmesi rastgele olmamaktadır. Genel olarak hücreler 3 ana katman halinde ve her katman içinde paralel, bir araya gelerek ağı oluştururlar. Bu katmanlar; Girdi Katmanı, Ara Katmanlar (Gizli Katman) ve Çıktı Katmanı' dır. Şekil 2.17 bu katmanların birbiri ile ilişkisini göstermektedir [56].



Şekil 2.17 : Bir yapay sinir ağı örneği [57].

Problemin öğrenilmesi, ağdaki ağırlıkların en doğru değere ulaşmasıyla mümkün olmaktadır. Ağırlıkların doğru değere ulaşması ise ağa gösterilen örnekle sağlanmaktadır. Örnek veriler için ağın üreteceği çıktı değerinin gerçek sonuçlara yakınlık derecesi göz önüne alınarak örnekler ağa tekrar tekrar gösterilmektedir. Her adımda çıktı ile gerçek değer arasındaki hataya göre ağırlıklar değişmektedir. Problem öğrenildikten sonra YSA, daha önce hiç görmediği örnekler içinde doğru sonuçlar verebilmektedir [58].

YSA'nın konvansiyonel yöntemlere oranla bir problemi, problemin kendi özelliğine ait bir takım matematiksel formüller kullanarak çözmek yerine problemi örnekler üzerinden öğrenmeleri, değişen şartlara uyum sağlayabilmeleri ve gürültülü datalardan bir problemin özünü öğrenebilmeleri gibi avantajları nedeniyle özellikle mühendislik de çok geniş bir uygulama alanı vardır. Birçok araştırmacı, malzeme ve yapı alanında, betonun mekanik özelliklerinin geri dönüşümlü agregalar ile yapılan betonların mekanik özelliklerini, çatlak genişliğini, kompozit lifli (çelik ve polimerik) betonun yük deplasman eğrisinin tahmini için YSA'nın kullanılabilirliğini araştırmıştır. Beton basınç dayanımını belirlemek için görüntü işleme ve YSA yöntemlerini birlikte kullanarak analitik bir model yapılmıştır. Analitik modellemenin başarısını deneysel verilerle karşılaştırarak uygun sonuçlar elde edilmiştir. YSA modelinin güvenilir ve doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Betonun rötre (büzülme) çatlaklarını tahmin etmek amacıyla YSA modelleri geliştirilmiştir. Bu modelleri geliştirirken betonun rötre (büzülme) çatlaklarını etkileyen betonun yapım ve koruma parametreleri ele alınmıştır.

Agrega ve harcın elastisite modülünden, betonun elastisite modülünü bulabilmek için YSA yöntemi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, YSA ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırarak, agrega ve harç özelliklerinden betonun elastisite modülünün hızlı ve iyi bir şekilde tahmin edilebileceği belirtilmiştir [59].

Betonda klor geçirgenliğini, çimento tipi, kür şartları ve süresi açısından tahmini, betonun erken yaş dayanımı ve diğer mekanik özellikleri, ağır betonların basınç dayanımları, hasarsız deney teknikleri kullanılarak laboratuvar ortamında alınan deneysel verilerle karşılaştırmak üzere, kiriş benzeri yapılarda oluşacak hasarların miktarı ve yerinin tespiti için global ve yerel titreşim analizi verilerini kullanarak YSA ile modelleme yapılmıştır [58].

2.8 Literatür Özetleri

Doğan ve Şener (2004), yaptıkları çalışmada, hafif yapı malzemeleri kullanılarak inşa edilen binaların ısıtma ve soğutma giderlerinde %50'ye varan oranda enerji tasarrufu sağlandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca ponza, perlit, gaz beton, vermikülit vb. hafif yapı malzemelerini ithal eden İsveç, Norveç gibi soğuk ülkelerde bir konutun ısıtma maliyetinin, Türkiye'deki eşdeğer konutun ısıtma maliyetinin yarısından az olduğunu saptamışlardır. Dünyada ve ülkemizde kullanılan toplam enerjinin önemli bir kısmının konut ve binaların ısıtılmasında kullanıldığı düşünüldüğünde, ısı ve enerji tasarrufu yönünden konunun hayati önem arz ettiğini vurgulamışlardır. Türkiye'de elektrik kullanan 25.000.000 civarında konutun tamamında yalıtım değeri yüksek yapı malzemeleri kullanılarak iyi bir yalıtım yapılmış olması durumunda, ülkemizin ısınma ve soğutma nedeniyle her yıl yapacağı enerji tasarrufunun 10 milyar dolar civarında olacağını, bu rakamın, enerjinin verimsiz kullanılması nedeniyle kaybedilen ve göz ardı edilmemesi gereken önemli bir kaynak israfı olduğunu belirtmişlerdir [60].

Özgenç ve Sariözen (1999), gaz beton ham maddelerinin homojen olarak karıştırılabilmesi ve reaksiyonların düzenli oluşması için karışıma eklenen su miktarının minimum %68-72 arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir. Su/çimento oranını (W/C) 0,98 olarak hesaplamalarda kullanmışlardır. Gaz beton üretiminde kullanılan ana ham maddelerden biri olan kuvars yerine, belirli oranlarda perliti karıştırarak hazırladıkları denemelerde basınç dayanımı, rötre (büzülme) deneyleri yapmışlar, ürünlerin fiziksel özelliklerini belirlemişlerdir. Sonuçlar normal gaz beton özellikleriyle karşılaştırıldığında G2/04 sınıfı gaz beton reçetesinde kullanılacak optimum ham perlit oranının %30 olduğunu ortaya koymuşlardır [14].

Jin vd. (2016), yaptıkları çalışmada 415, 520 ve 630 kg/m³ lük üç farklı yoğunluğa sahip gaz beton (AAC) bloklar üretmişler, %100 nemli numunelerin termal iletkenliğini ölçmüşlerdir. Yaptıkları modelleme ile nem içeriği arttıkça ısıl iletkenliğin de arttığını ortaya koymuşlardır [61].

Kadashevich vd. (2005), yaptıkları çalışmada gaz beton içerisindeki hava kabarcıklarının dağılım şekilleri ve geçirgenliklerini inceleyip, gaz beton bünyesindeki gözenekleri, geometrik yapısının istatistiksel modellemesini yapmışlar, basınç dayanımı, ısıl iletkenlik, nem ve diğer özellikler için bu modelin uygun olabileceğini ileri sürmüşlerdir [62].

Chen vd. (2017), çalışmalarında silika-kireç-çimento bileşimini ve otoklavlama koşullarının etkilerini incelemiştir. Yüksek ve düşük buhar kürü, su/katı oranı, buhar kürü süresi, köpük yapıcı madde miktarının gaz beton örneklerinin basınç dayanımı, yoğunluk ve mikro yapı özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Gaz beton yoğunluğunun ilave edilen alüminyum tozu miktarı ve su/katı oranından etkilendiğini ileri sürmüşlerdir. Otoklav kürü basınç dayanımında oldukça etkilidir. Ürettikleri gaz betonda kür zamanı, buhar basıncı, su-katı oranı, ham madde karışım oranları ve gözenek oluşturucu Al tozu miktarının etkilerini araştırmışlardır. Gaz betonun yoğunluk, basma dayanımı, mikroyapı özelliklerini test etmişler, XRD, porozimetre ve termal analiz yöntemlerini kullanmışlardır. Gaz betonun yoğunluğunun Al tozu miktarından ve özellikle su-katı oranından etkilendiğini vurgulamışlardır. Çimento miktarındaki artışın basınç dayanımı için gerekli oranda önemli olmadığını belirtmişlerdir. Buna karşılık otoklav kürünün basınç dayanımını büyük ölçüde arttırdığını, buhar basıncının artırılması ile aynı basınç değeri için kür süresinin azaltılabileceğini ve buna karşılık kür süresinin uzatılması ile düşük buhar basıncı koşullarında da, basınç dayanımı için yararlı olabileceğini savunmuşlardır [2].

Walczak vd. (2015), çalışmalarında ısı geçirgenlik katsayısı olan U değerinin $0,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ değerinden daha yüksek olamayacağını ileri sürmüşlerdir. Bu şartları yerine getirmede daha iyi termik yalıtım malzemeleri kullanmanın çözüm olacağından bahsetmişlerdir. Çimento kullanmadan kireç, alçı ve uçucu külden oluşan gaz beton üretmişler, basma dayanımı, yoğunluk, ısı iletim katsayısı (λ) analizlerini yapmışlardır. Basma dayanımını $1,6-2,3 \text{ MPa}$, birim hacim ağırlığı $340-365 \text{ kg/m}^3$, ısı iletim katsayısını (λ) en düşük $0,0074 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olarak ölçmüşlerdir. Gaz betonun kum veya uçucu kül gibi farklı agregalar kullanılarak üretilebileceğini ifade etmişlerdir. Isıl iletkenlik deney sonuçları incelendiğinde, aynı birim hacimdeki uçucu kül katkılı gaz betonun, kum katkılı gaz betona kıyasla ısıl iletkenlik katsayısının (λ) daha iyi sonuçlandığını, birim hacim ağırlığın artmasıyla ısıl iletkenlik katsayısının da arttığını belirtmişlerdir [63].

Yi vd. (2016), çalışmalarında otoklavlı gaz betonun (AAC) su buhar difüzyon katsayısının geçici bir yöntemle deneysel olarak belirlenmesini hedeflemişlerdir. Ölçümler $15-45 \text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki sıcaklıklarda %1-90 bağıl nem aralığında yapılmıştır. Su buharı difüzyon katsayısının gözeneklerin varlığına bağımlılığının basit olmayacağını ortaya koymuşlardır. Su buharı difüzyon katsayısının, yüksek sıcaklıklarda arttığı, nem bağlanmasının ise düşük sıcaklıklarda bastırıldığı gösterilmiştir. Çalışmada gözenek ve sıcaklık etkilerini inceleyerek

nem seviyelerini ölçmüşler, difüzyonda, makro gözenekliliğin, mikro gözeneklilikten daha etkili olduğunu vurgulamışlardır [64].

Cabrillac vd. (2006), çalışmalarında gaz betonların mekanik anizotropisini ve uygulanan gözenekliliğin parametrelerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada bağlayıcı maddenin niteliği, su, kum miktarı ve oranlaması, genişletici maddenin oranları değiştirilmiştir. İlk olarak her parametrenin uygulanan gözeneklilik üzerindeki etkisi ve üretilen porozite oranlarında malzemenin mekanik dayanım ve anizotropisi araştırılmıştır. Gaz betonların genişmesi sırasında elipsoidal gözeneklerin geliştirilmesinin, betonun mekanik ve termal özelliklerinde, bir anizotropi oluşturduğunu göstermiştir. Özellikle eliptik gözeneklerin hizalandığında maksimum kuvvet yönünün, minimum termal iletkenlik yönüne dik olduğu belirtilmiştir. Bu özellik bina yapımında dikey yapı elemanlarının, termo-mekanik davranışını optimize etmek için kullanılabilir. Bu çalışmada anizotropik özellikli betonların spesifik özelliklerini kullanarak otoklav işlemine gerek kalmadan mekanik dayanımlarının geliştirilmesine imkan veren parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca kompozisyon parametrelerinin malzemenin mekanik dayanımları üzerindeki etkisi de incelenmiştir [65].

Jerman vd. (2013), yaptıkları çalışmada ticari gaz beton örneklerinin termal özelliklerini, yoğunluklarını, basınç dayanımlarını, fiziksel ve durabilite özelliklerini araştırmışlardır. Yoğunlukları 300-500 kg/m³, basınç dayanımları 1,8-4 MPa olan aynı üreticinin 3 farklı ürününü incelemiştir. Analiz edilen gaz betonların, yüksek sıvı taşıma kapasitesine sahip olduklarını, nem depolama kapasiteleri yüksek olduğundan bina cephelerinde nem tampon katmanları olarak kullanımlarının mümkün olabileceğini ileri sürmüşlerdir. Termal iletkenliğin, nem içeriğinin artmasıyla altı kat arttığını belirlemişlerdir [66].

Isu vd. (1995), yaptıkları çalışmada gaz betonda kullanılan kuvarsın farklı boyutlarının kimyasal özelliklere etkisini araştırmışlardır. Örnekler 0,5-64 saat arasındaki çeşitli zamanlarda, 180 °C buhar basıncı altında hazırlanmıştır. İnce taneli kuvars kullanımının işlem süresini azaltabileceğini ileri sürmüşlerdir. Daha iri kuvars ile üretilen betonlarda oluşan tobermoritin daha iyi kristalizasyona sahip olduğu görülmüştür. Kısa otoklavlama süresinde, ince kuvarsın reaksiyon derecesinin, iri olandan daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir [67].

Matsui vd. (2011), gaz betonun üretimi sırasında tobermoritin, hidrotermal oluşumunu XRD analizi ile araştırmışlardır. Silis kaynağının ve alüminyum ilavesinin tobermorit oluşumu

üzerindeki etkisini de incelemiştir. Tüm durumlarda CSH fazı ile $\text{Ca}_{10}(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH};\text{F})_2$ ve $\text{Ca}_3\text{Al}(\text{SiO}_4)_{3-x}(\text{OH})_{4x}$ ($X=1,5-3$) ara ürün olarak oluşmuştur. Alüminyum ilavesinin tobermorit oluşumunu hızlandırdığını, kuvarsın çözünme hızını etkilemediğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında farklı kuvars kumları ve değişik oranlarda alüminyum katkısı ile üretilmiş gaz betonların yapılarını incelemişler, daha az silis içeren malzemelerin de gaz beton üretiminde kullanılabilceğini saptamışlardır. Hidrotermal reaksiyon sırasındaki yapısal değişiklikler hakkında detaylı bilgi elde etmişlerdir [68].

Hamad (2014), yaptığı çalışmada literatür incelemesi yaparak kullanılan ham maddeleri, uygulamaları, sınıflandırmaları, gözeneklilik, geçirgenlik, basınç dayanımı gibi özellikleri incelemiştir. Yaptığı sınıflandırmada yoğunluğunun 450 kg/m^3 , basınç dayanımının $3,2 \text{ MPa}$, ısı iletkenliğinin $0,12 \text{ W/mK}$ olması gerektiğini vurgulamıştır [69].

Gopalakrishnan ve Sowndhararajan (2017), çalışmalarında gaz beton için kullanılacak kirecin toz halde saflığının ve kalsiyum oksit içeriğinin %80 den yüksek olması gerektiğini vurgulamışlardır. Kirecin amacı malzemeler arasında bağı ve alüminyum tozu ile tepkimeye girerek H_2 gazı oluşturmaktır. Çalışmalarında gaz betonunda kullanılan malzemeler üzerinde ön çalışmalar yapılmış ve daha sonra karışımlar oranlanmıştır. Uçucu kül kullanarak ürettikleri gaz betonda, basınç dayanımı, eğilme dayanımı gibi mekanik testler yapmışlar, basma dayanımını $3,66-4 \text{ MPa}$, eğilme dayanımını $0,28-0,316 \text{ MPa}$ arasında ölçmüşlerdir [70].

Narayanan ve Ramumurthy (2000), çalışmalarında gaz betonun mikro yapısını incelemiştir. Gaz beton bileşimi ve kürlenme yönteminin, ürünlerin mikro yapısını, fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilediğini ileri sürmüşlerdir. Otoklavda 10 bar basınçta, 8 ve 10 saat sürelerde kürlenmiş numuneler $90, 150, 180$ gün bekletilmiştir. Hazırlanan karışımda çimento/kuvars oranı $1:3$ olarak belirlenmiştir. Gaz beton örneklerine SEM ve XRD analizleri, mekanik testler yapılmıştır. Ürünlerin basınç dayanımlarını $5,5-14,5 \text{ MPa}$ arasında ölçmüşlerdir. Üretilen otoklavlanmamış gaz betonun yapısının zamanla değişikliğe uğradığını, otoklavlanmış ürünlerin daha kararlı bir yapı gösterdiğini vurgulamışlardır. Otoklavlanmış ürünlerin daha iyi kristallendiğini bu nedenle daha yüksek mukavemet gösterdiğini belirtmişlerdir [71].

Evgeniya (2016), çalışmasında uçucu kül ve bitüm kullanarak gaz beton üretmiş, nem tutma oranının atık katkısıyla azaldığını yaptığı deneylerle göstermiştir. Ürettiği betonlarda su yalıtımı sağlayan katkı malzemeleri kullanılarak hidro fiziksel özelliklerin önemli ölçüde

değiştirilebileceğini belirtmiş ve düşük bitümlü hidrofobik malzeme kullanımı ile nem içeriğini %28 e kadar azaltmıştır. Yoğunluğu 600 kg/m^3 , basınç dayanımını 4 MPa olarak test etmiştir [72].

Araujo vd. (2005), yaptıkları çalışmada atık folyo ile üretilen gaz betonun özelliklerini, üretim sırasında oluşan gaz oluşum mekanizmasını, boşlukların boyutu ve basınç dayanımlarını araştırmışlar ve atık alüminyum ile yüksek kaliteli, gözenekli gaz beton üretilebileceğini belirtmişlerdir [73].

Huang vd. (2012), çalışmalarında bakır cevher atıklarını ve yüksek fırın cürufalarını gaz beton da kireç ile ikame ederek ürünlerin özelliklerini araştırmışlardır. Hidratasyon sürecinde atıkların getirdiği elementlerin reaksiyona katılıp, tobermorit yapısına girmiş olduğunu öne sürmüşlerdir. Hazırladıkları gaz betonun yoğunluğunu $610,2 \text{ kg/m}^3$, basınç dayanımını ise 4 MPa olarak ölçmüşlerdir. Farklı kütleme yapılan numuneler üzerinde XRD, FESEM, ^{29}Si , ^{27}Al NMR analizleri uygulanmıştır. Mineralojik yapısı incelendiğinde ana mineralin tobermorit olduğunu, anhidrit, kuvars, kalsit, dolomit ve eser miktarda bakır atığından gelen diğer minerallerinde bünyede bulunduğunu belirlemişlerdir [74].

Holt ve Raivio (2005), çalışmalarında, uçucu kül atıklarının gazlaştırılmasıyla meydana gelen tortunun, gaz betonda (AAC) kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Gaz beton üretiminde kullanımı ile ekstra alüminyum ihtiyacının ortadan kaldırılıp kaldırılamayacağını belirlenmeye çalışılmıştır. Yoğunluk, basma ve çekme dayanımları, elastisite modülü ve yüzey alanı, kuru küçülme miktarı, nem içeriği deneyleri ile sonuçların olumlu olduğu gözlemlenmiştir [17].

Güçlüer vd. (2015), tarafından yapılan çalışmada gaz beton üretiminde kullanılan silis kumu ile uçucu kül, çimentoyla silis dumanı yer değiştirilerek gaz beton üretilmiş, üretilen numuneler üzerinde farklı buhar kürleri uygulanarak, yoğunluk, basınç dayanımı, ultrasonik hız ölçümleri gerçekleştirilmiş ve mikroyapılarındaki değişimler araştırılmıştır. Ürünlerin yoğunluk değerleri $600-700 \text{ kg/m}^3$, basınç dayanımları 2,5-4,4 MPa, olarak belirlenip, uçucu külden üretilen gaz betonların, kuvars kumundan üretilenlere kıyasla daha iyi yalıtım ve mukavemet özelliklerine sahip oldukları gösterilmiştir [75].

Günaydın vd. (2016), çalışmalarında mermer tozu atığı ve uçucu kül ile üretilen gaz betonun özelliklerini belirlemek için birim hacim ağırlık, ultrasonik dalga hızı, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik deneyleri yapmışlar, birim hacim ağırlıklarının $610-740 \text{ kg/m}^3$, basınç dayanım

değerlerinin 1,35-2,64 MPa ve ısı iletkenlik değerleri ise 0,20-0,15 W/mK arasında olduğunu belirlemişlerdir [76].

Abdullah vd. (2006), yaptıkları çalışmada çimento yerine palm yağı külü kullanmanın gaz beton üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Portland çimentosunu azaltıp, palm yağı külünü çimentoya %10-20-30-40-50 oranında ikame ederek, 7 ve 28 gün sonraki basınç dayanımlarını test etmişlerdir. Basınç dayanımının 2-5 MPa arasında olabileceğini belirtmişlerdir. Kül katkısının artmasıyla basınç dayanımının düştüğünü gözlemlemişler, katkısız gaz beton örneklerinin basınç dayanımlarını 7. günde 5,49 MPa, 28. günde 7,70 MPa, kül katkılı gaz beton örneklerinin basınç dayanımlarını 7. günde 0,63 MPa, 28. günde 0,96 MPa olarak ölçmüşlerdir. Palm yağı külünün gaz betonda %10-35 arasında kullanımının uygun olabileceğini belirtmişlerdir. Palm yağı kül atığının kısmi olarak çimento yerine kullanılabilmesini ve çimentonun bu nedenle çevreye olan etkisinin azaltılabileceğini, çevresel koruma ve sürdürülebilirliği konusunda yeni malzemeler kullanmanın oldukça popüler bir konu olduğunu belirtmişlerdir [77].

Rozycka ve Pichor (2016), yaptıkları çalışmada gaz betonda perlit atığı kullanımının fiziksel, kimyasal, mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlar, atığı kuvarsla farklı oranlarda ikame ederek, atığın yoğunluk ve basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada gaz betonun yoğunluğunun düştüğü ve bunun sonucu olarak diğer özelliklerinde değiştiği belirlenmiştir. Artan perlit atığı ile ısı iletkenlik ve dayanım değerleri de azalmıştır. Perlit atığının %10 olduğu örneklerde termal iletkenlik %15 azalırken, basınç dayanımında önemli bir azalma gözlemlenmemiştir. Fakat %30 katkılı örneklerde, basınç dayanımı %20 oranında azalmıştır. %40 katkılı örneklerde en düşük termal iletkenlik 0,074 W/mK olarak ölçülmüştür. Kimyasal incelemeler sonucunda perlit atıklarının tobermorit oluşumunda olumlu bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Gaz betonun mekanik özelliklerinin kalsiyum silikat hidrat (tobermorit) ile bağlantılı, kalsiyum silikat hidrat (CSH) sentezinde belirleyici faktörün SiO₂ modifikasyonları olduğunu belirtmişlerdir. Perlit atığının, kuvarstan daha iyi çözünürlüğe sahip olduğu için gaz beton içerisindeki CSH sentezinde ve mekanik özelliklerde olumlu bir etkiye sahip olduğunu, diğer yandan CaO/SiO₂ oranı, SiO₂ formu, reaksiyon süresi ve sıcaklık katkı maddelerinin varlığı ile gaz beton özelliklerini önemli bir şekilde etkilendiğini belirlemişlerdir. Perlit atığının gaz beton üretiminde agrega olarak kullanılan kuvars kumuna, ikame olabileceği vurgulamışlardır [78].

Kunchariyakun, vd. (2015), çalışmalarında hem pirinç kabuğu külünü hem de alüminyum içeren atığı gaz beton üretiminde kullanmışlar, üretilen gaz betonların fiziksel ve mekanik

özelliklerini belirlemişlerdir. Pirinç kabuğunda bulunan SiO_2 , kabukların sinterlenmesi sonrasında elde edilen kül hızlı bir şekilde soğutulursa amorf, yavaş bir şekilde soğutulursa kristal SiO_2 meydana geldiğini, amorf olan SiO_2 'nin özgül yüzeyinin $50\text{-}60 \text{ m}^2/\text{g}$ gibi yüksek bir değer de olduğunu, bu sebeple puzolanik aktivitesinin fazla olduğunu belirtmişlerdir. Atıklar parçacık boyutuna göre sınıflandırılıp Al atığı %5-10-15-20 oranlarında kullanılan Al tozuna ikame edilmiştir. Elde edilen numunelerin referans numuneden daha düşük birim hacim ağırlığına ve basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Tobermorit oluşumunda pirinç kabuğu külü içindeki yüksek reaktif silikanın etkili olduğu ifade edilmiştir. 4 saat süreli otoklav kürü sonrasında elde edilen numunelerin SEM görüntülerinde, tobermorit yerine fibröz kalsiyum silikat hidratın (CSH) oluştuğunu göstermişlerdir [79].

Kurama vd. (2009), araştırmalarında Tunçbilek termal enerji santralinden çıkan külün, gaz betonda agrega ikamesi olarak kullanımı konusunu incelemişlerdir. Kül gaz beton içerisine değişik oranlarda eklenerek elde edilen ürünlerin fiziksel, kimyasal, mekanik, termal analizleri gerçekleştirilmiş; mikroyapı fotoğrafları incelenmiştir. Sonuçlarda, bütün kül ekleme oranları için, son üründe birim hacimde azalma tespit edilmiştir. Kül ekleme oranındaki artışın ısı öz iletkenlikte azalmayla neticelendiği görülmüştür. %100 kül ikamesinde ısı öz iletkenlikte referans gaz betona göre %36'ya varan azalma tespit edilmiştir. %50 ikame oranında ısı öz iletkenlik değerinin, ticari gaz betona göre %15 fazla olmakla birlikte kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu ifade etmişlerdir [41].

Mostafa (2005), çalışmasında kireç ve kum karışımı ile üretilmiş gaz betonları, cürufu ile üretilmiş gaz betonlarla kıyaslayarak, yapılan hidrasyon ve basınç dayanımı deneylerinin sonuçları hakkında bilgiler vermişlerdir. Çalışmada XRD, SEM, EDX analizleri ile hidrasyon ürünlerinin tipleri araştırılmış, basıncın 8 bar, otoklavlanma süresinin 2-6-12-24 saat olduğu koşullarda numuneler hazırlanmıştır. Yüksek basınç dayanımı, düşük kireçli (%10 CaO) karışımlar için %50 cüruf, yüksek kireçli (%25 CaO) karışımlar için %30 cüruf katkısı ile elde edilmiştir. SEM analizinde lifli kalsiyum açısından zengin CSH, iğnemsiz tobermorit kristalleri gözlenmiştir [39].

Liu vd. (2017), çalışmalarında gözenek oluşturucu katkı olarak atık alüminyum tozununu, ticari alüminyum tozuna ikame olarak kullanmışlardır. Gaz betonda 1 g ticari alüminyum tozu ile 15,6 g alüminyum atığı, aynı miktarda H_2 gazı meydana getirmektedir. Gaz betonu oluşturmak için %99 saflıkta $80 \mu\text{m}$ mikro silika (SiO_2), %90 saflıkta kireç (CaO), %99 saflıkta alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve alüminyum atığı kullanmışlardır. Gaz beton $210 \text{ }^\circ\text{C}$, 2

MPa, 18 saat süreli otoklav kürü yapılmıştır. Gaz betonda XRD, FESEM, XRF, yoğunluk, basınç dayanım analizlerini gerçekleştirerek, ürünlerin fiziksel, kimyasal ve mikro yapılarını incelemiştir. Çalışmalarında atık katkılı gaz betonun yoğunluğunu $400-800 \text{ kg/m}^3$, basma dayanımını 1,1-2,9 MPa olarak belirlemiştir. Alüminyum tozu atığı yoğunluk için olumlu sonuçlar verirken, basma dayanımı için durum tersidir. Çalışmada alüminyum atık tozunu, gaz betonda kullanılan maliyeti yüksek olan ticari alüminyum tozuna alternatif olabileceği vurgulanmıştır [6].

Gunasekaran vd. (2016), çalışmalarında gaz beton kullanarak hafif betonun geliştirmeye çalışmışlardır. Doğal kum yerine kısmen uçucu kül, çimento yerine kısmen bağlayıcı olarak kireci ikame etmişlerdir. Su/çimento oranını 0,6 olarak almışlar, kireçli ve kireçsiz karışımlar hazırlamışlardır. Alüminyum tozunu toplam ağırlığa göre 0,25-0,5-0,75-1 oranlarında kullanmışlardır. 24 saat buhar kürü sonucu gaz beton örneklerinin yoğunluğunu, su emme oranını, basınç dayanımını belirlemiştir. Basma dayanımını kireçsiz örneklerde 3,6-5,5 MPa, kireçli örneklerde 4,1-6,9 MPa olarak ölçmüşlerdir. Su emme değerlerinin kireçsiz örneklerde 15,97-20,84, kireçli örneklerde 15,43-21,71; yoğunluk değerlerinin ise $1364,6-1854,7 \text{ kg/m}^3$ arasında değiştiğini belirlemiştir [80].

Wu vd. (2018), çalışmalarında, mekanik olarak aktifleştirilmiş nikel atığını gaz betonda kullanmışlardır. Nikel atığı kullanılarak üretilen gaz betonların içerisinde bulunan kalsiyum miktarının, silisyum miktarına oranının, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Nikel atıklı gaz betonlar üzerinde XRD, FTIR, SEM analizleri ile yapıları analiz edilmiştir. Kalsiyumun silisyuma oranının 0,65 olması durumunda basınç dayanımını 3,5 MPa, eğilme dayanımını 2,1 MPa olarak ölçmüşlerdir. Nikel atıklı gaz betonda tobermorit ve etrenjit fazları oluşmuş, bu yapılar SEM analizi ile belirlenmiştir. Bu çalışmanın nikel atıklarının kullanımına yeni bir yaklaşım getirdiğini ileri sürmüşlerdir [81].

Song vd. (2015), iki tür uçucu kül kullanarak gaz beton üretmişler, bu iki tür uçucu kül ile ürettikleri gaz betonların özelliklerinin farklı olduğunu göstermişlerdir. C/S oranları gaz betonun hidratlarını ve gözenek yapısını değiştirerek, özelliklerin değişmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle rastgele uygulanmaması gerektiğini savunmuşlardır [82].

Begum vd. (2014), çalışmalarında otoklavsız gaz betonda pirinç kabuğu külünü agregaya %0-20-30-40-50 oranlarında ikame olarak kullanmışlar, birim hacim ağırlığın bütün örnekler de düştüğünü belirlemiştir. Örnekler üzerinde su emme, yoğunluk ve basınç dayanımı deneylerini yaparak karşılaştırmalar yapmışlardır. Optimum ikame oranının %30

olduğunu göstermişlerdir. Ürettikleri gaz beton ürünlerin yoğunluklarını 553-670 kg/m³, basınç dayanımlarını 0,06-4,27 MPa, su emme oranını %25-47 olarak belirlemişlerdir [83].

Drochytka vd. (2013), çalışmalarında endüstriyel atık cüruflar kullanarak gaz beton üretmişler, silis ile üretilen gaz betonlar ile kıyaslama yapmışlardır. Uçucu kül ilavesinin gaz betonda daha büyük nem tutma eğilimi ve daha düşük ısı iletkenlik elde edilmesini sağladığını vurgulamışlardır [84].

Lekūnaitė vd. (2012), çalışmalarında nano amorf silika ve nano karbon fiberleri katkı malzemesi olarak kullandıkları gaz betonlarda kıvam, yayılabilirlik, genleşme etkilerini araştırmışlardır. Katkı malzemelerinin optimum oranlarının amorf silika için %1, karbon fiber için %0,1 olduğunu belirlemişlerdir. Amorf silika ile oluşturulan gaz betonların yayılabilirlikleri %5 azalmış, genleşme sıcaklığı %2 artmıştır. Karışımın genleşme yüksekliği %11, plastik mukavemeti %271,4 artmıştır. Karbon fiber ile yapılan gaz beton karışımlarda yayılabilirlik %11 azalmış, genleşme sıcaklığı %1,5, genleşme yüksekliği %16 düşmüştür. Plastik mukavemet %152,9 artmıştır. Amorf silikanın muazzam boyutlu küçük kapalı gözeneklerin oluşmasına katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir [85].

Cai vd. (2016), yaptıkları çalışmada demir atıklarını kullanarak ürettikleri gaz betonda, mekanik ve hidrasyon özelliklerine, içerik ve tane boyutunun etkisini araştırmışlardır. Gaz beton numunelerinin hidrasyon ürünlerinin morfolojisini FESEM-EDX, mineral bileşimini XRD, termal özellikleri TG-DSC, kristal özellikleri ²⁹Si-NMR ile analiz etmişlerdir. Hidrasyon özellikleri demir atığının içeriği ve tane boyutundan etkilenmektedir. Artan demir atığı oranı ile gaz betonun mekanik özellikleri olumsuz etkilenmektedir. Gaz beton ürünlerinde ana mineraller CSH jel, tobermorit, anhidrit, hidrogarnet ve az miktarda ferrik oksit, beyaz mika eşliğinde kuvars ve kalsit içeren bazı kalıntı minerallerdir. Demir atığı arttıkça kalsiyum silikat hidratların (CSH) miktarı azalmaktadır. Atığın ince olması otoklavlama işlemi sırasında beyaz mikanın ayrışmasını hızlandırmakta ve tobermoritin kristalizasyonu üzerinde olumsuz bir etki yapmaktadır. Çalışmada atık içindeki Al ve Mg iyonlarının hidrotermal reaksiyon sırasında tobermorit yapısına girdiğini öne sürmüşlerdir [86].

Pehlivanlı vd. (2015), çalışmalarında polipropilen, karbon, bazalt ve cam fiberleri gaz beton da kullanılarak basınç, eğilme mukavemeti ve termal iletkenlik değerleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu katkılar kullanılan agrega ile ikame edilerek, üretilen gaz beton numuneler 4 saat süreyle 60 °C sıcaklıkta bekletildikten sonra 180 °C ısı ve 11 Bar basınçta,

6,5 saat boyunca otoklavda kütleme işlemi yapılmıştır. Ürünlerin mekanik özellikleri, ısı iletkenlik değerleri, mikro yapısal özellikler incelenmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri karbon fiber örneklerde 3,38 MPa, eğilme dayanımı değeri en yüksek yine karbonfiber örneklerde 1,21 MPa olarak ölçülmüştür. Kuru yoğunlukları 415-420 kg/m³ arasında değişmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde gözenek boyutunun 1-1,5 mm arasında olduğu görülmüştür. Gaz betona yapılan lif takviyelerinin tobermorit oluşumunu engellemediği, aksine aderansı güçlendirdiği ileri sürülmüş, uyumu sağlayan katkının bazalt lifleri olduğu belirtilmiştir [87].

Melnyk vd. (2013), çalışmalarında endüstriyel atıklar kullanarak gaz beton üretmişler, tuz işleme atıklarının uygulanmasının geri dönüşümü nedeniyle bir yandan olumlu bir ekolojik etkiye sahip olduğunu, diğer yandan ekonomik ve teknik etkilerini vurgulamışlardır. Gaz betonda %10 a kadar atık katkısının mukavemetin artmasına, sülfat taşıyan atıkların kullanılmasının mekanik mukavemetin azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Polipropilen elyafın bileşime katılması betonların mukavemet özelliklerini geliştirdiğini üretilen betonların yoğunluklarının 650 kg/m³, basınç dayanımlarının 2,7 MPa olduğunu göstermişlerdir [88].

Haoi ve Min (2017), çalışmalarında, atık camların gaz betonda etkisini araştırmışlardır. Atık camların düzenli depolama alanlarına biriktirilmesinin sürdürülebilir bir çevresel çözüm olmadığını, atık camların yeni cam ürünlere geri dönüştürülebileceğini ancak yüksek enerji gerektiren ayırma, öğütme ve yeniden eritme işleminin uzun vadede uygun olmadığını vurgulamışlardır. Ayrıca bu geri dönüşüm süreci yanlış kullanım durumunda hava kirliliğini de tetikleyebilmektedir. Atık camın, yapı malzemesinde ham maddelere dönüştürülmesi, inşaat sektöründe çekici bir seçenek oluşturmaktadır. Faydası sadece doğal kaynaklara bağımlılığı azaltmakla kalmayıp, bertaraf maliyetini, çöp depolama hacmini azaltmakta ve çevremize karbondioksit emisyonunun düşmesine yardımcı olmaktadır. Çalışmada %10 atık cam kullanılan örnekler de 28 günlük basınç dayanımı 1,56 MPa, %20 atık cam kullanılan örnekler de 28 günlük basınç dayanımları 1,59 MPa olarak tespit edilmiştir. Ürünlerin yoğunlukları 620-738 kg/m³ arasında değişmektedir. Yazarlar cam atığının çimento yerine kullanılabilmesini, camın inceliğinin, çimentonun aktive indeksi üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır [89].

Wang vd. (2016), çalışmalarında demir cevheri atıkları ile kömür kaynaklarını kullanarak gaz beton üretmişler ve bu gaz betonun özelliklerini araştırmışlardır. Ürünlere TGA, XRD, SEM analizleri uygulanmıştır. Elde edilen gaz beton ürünlerin yoğunluğunu 609 kg/m³,

basınç dayanımını 3,68 MPa olarak belirlemişlerdir. Hidrasyon ürünlerini tobermorit, $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4$, etrenjit, CSH jel olarak tespit etmişlerdir [90].

Pedro vd. (2017), çalışmalarında cevher ve mücevher sektörü atıklarını gaz beton da kullanmıştır. Silis içeren akik taşı atığının, kuvars kumunun yerini alarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Basınç dayanımları, yoğunlukları ve hava boşluklarının dağılımını belirlemek için analizler yapmışlardır. 28 gün oda sıcaklığında bekleyen numunelerin yoğunluğunu 430 kg/m^3 , basınç dayanımını 1,07 MPa olarak ölçmüşlerdir [91].

Ogrodnik ve Szulej (2017), çalışmalarında seramik agregaları gaz betonda kullanarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. %0-5-10 oranlarında seramik içeren karışımlar hazırlayarak gaz beton örnekler üretmişlerdir. Basma ve eğilme dayanımları belirlenerek, %10 katkılı ürünlerde basma ve eğilme dayanımının arttığını belirtmişlerdir [92].

Walczaka vd. (2015), çalışmalarında farklı tür cam atıklarını, gaz betonda kuvars yerine ikame etmişler; ürünlerin mikroyapı, yoğunluk, basma ve çekme dayanımları, kimyasal karakterizasyonunu araştırmışlardır. Amorf SiO_2 içeren camlar çimentonun hidrasyonu sırasında kireçle reaksiyona katılmaktadır. Kireçle reaksiyon sonucu jel kalsiyum hidro silikatların (CSH) yanı sıra hidro alüminatlar, hidrogarnetler ve diğer hidratlar oluşmaktadır. Bu yeni oluşumlar betonun mukavemetini arttırmaktadır. %20 katkılı yüksek fırın cürufu camlarla üretilen gaz betonun basınç dayanımı, referans numune ile kıyaslandığında %33 oranında azalmıştır. Bu düşüşte tane boyutunun etkili olduğunu vurgulamışlardır. Mikroyapı SEM ile incelenmiş, tobermorit ve CSH jelinin tüm ürünlerde ana hidrasyon ürünleri olduğunu göstermişlerdir. XRD sonuçları da ana ürünün CSH jele ait olduğunu doğrulamıştır. Farklı türlerde cam atıkları eklenerek gaz beton üretmenin mümkün olduğunu, referans numune ile atık gaz beton numunelerinin benzerlik gösterdiğini, cam tozunun puzolanik karakteristiklerinin, basınç dayanımı arttırmanın ana nedeni olabileceğini vurgulamışlardır [42].

Didamonya vd. (2019), çalışmalarında tarım ve endüstriyel atıkları kullanarak ürettikleri gaz betonun özelliklerini incelemişlerdir. Yüksek fırın cürufu, pirinç atığı külü, silika dumanı, metakaolin kullanarak karşılaştırmalar yapmışlardır. Ürünlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinden yoğunluk, basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. Hidrasyon ürünlerini, XRD ve DSC tekniklerini kullanarak analiz edilip tanımlamışlardır. Silika kumuna kıyasla, %2,5 pirinç kabuğu külü ve %7,5 silis dumanı içeren numuneler en yüksek mekanik dayanımı göstermiştir. Metakaolin katkılı gaz beton yoğunlukları $520\text{-}525 \text{ kg/m}^3$, basınç dayanımları

1,5-3,5 MPa olarak belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufu katkılı gaz betonların basınç dayanımları 3,5-3,6 MPa arasında değişmektedir [93].

Wang vd. (2020), çalışmalarında mercan kumunu, normal beton ve gaz betona ekleyerek ürünlerin hidrotermal özelliklerini araştırmışlardır. 20-50 °C arasındaki ısı iletkenliğinin değişimi ve nemin gaz beton üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla su emme katsayısı sorpsiyon izotermelerini elde etmişlerdir. Isıl iletkenliğinin sıcaklıktan çok az etkilendiğini, nemin gaz betonun termal iletkenliği üzerindeki etkisinin, normal betona göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Bağlı nem %0 dan %100 e değiştiğinde, normal betonun ısı iletkenliğinin %39,25 oranında, gaz betonun ısı iletkenliğinin ise %89,35 oranında arttığını belirlemişlerdir [94].

Mermer vd. (2016), çalışmalarında çeşitli endüstriyel atıkları gaz beton üretiminde kullanmışlardır. Bu atıklar Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Orhaneli, Seyitömer ve altın madeni atıklarıdır. XRD, FTIR, XRF ile atıkların karakterizasyonunu belirlemişler, basınç dayanım değerini en yüksek Afşin uçucu kül ve kum katkılı örneklerde 1,09 MPa olarak belirlemişlerdir [95].

Xu vd. (2019), çalışmalarında odun lifli takviyeli gaz betonla, polyester elyaf takviyeli gaz betonu karşılaştırmışlardır. SEM, FTIR analizlerini yaparak gaz beton özelliklerini belirlemişlerdir. Odun lifinin artması ile birlikte akışkanlık, gözeneklilik azalırken, birim hacim ağırlığı ve termal iletkenlik az miktarda artmıştır. Odun lifi mekanik özellikleri önemli ölçüde arttırmıştır. SEM sonuçları odun lifinin takviye mekanizmasının fiziksel bir etkileşim olduğunu ortaya koymuştur [96].

Hustavova vd. (2019), çalışmalarında atık perliti gaz beton üretiminde kullanmışlar, atık perliti kuvars kumu ile %10-30-50-100 oranlarında ikame etmişlerdir. Optimal oranın %30 katkılı örneklerde olduğunu yaptıkları deneylerle göstermişlerdir. Üretilen gaz betonların hacim ağırlığı %40 oranında azalmış ve basınç dayanımı 0,9 MPa olarak belirlenmiştir [97].

Beton performansını arttıran yöntemlerden bir diğeri de beton içerisinde atık mermer tozunun kullanılmasıdır. Mermer atıklarının betonda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalarda, mermer tozu katkısının betonun bazı özelliklerine olumlu etki yaptığı belirlenmiştir. Yıldız vd (2011) çalışmalarında, ürettikleri numunelerin yarmada çekme dayanımlarını YSA ile belirleyebilmek amacıyla, YSA nın girdi seti olarak dozaj, agrega miktarı, lif oranı, mermer tozu oranı, porozite, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı değerlerini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, geliştirilen YSA modeli ile deneysel olarak

elde edilen veriler karşılaştırılarak, geliştirilen tahmin sisteminin güvenilir olduğunu belirlemişlerdir [98].



3. MALZEME VE YÖNTEM

Çalışmada kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin kimyasal, fiziksel özellikleri, gaz beton üretiminde kullanılan karışım oranları, hesapları ile deneysel çalışmalarda kullanılan materyal ve uygulanan yöntemler açıklanmıştır.

3.1 Malzeme

Gaz beton üretiminde kullanılan ham maddeler kuvarsit, çimento, alçı taşı, kireç, alüminyum tozu ve sudur. Gaz beton üretilirken kullanılacak olan endüstriyel ve madensel atıklar cam, mermer, seramik ve granit atıklarıdır. Kuvarsit Elazığ Erözsoy Madencilik kuvarsit maden ocağından, alçı taşı Malatya'nın Hekimhan ilçesi Yağca köyü yakınlarında bulunan Kolin Hekimhan Madencilik'e ait alçı taşı sahasından, cam atıkları cam atölyelerinden, mermer ve granit atıkları Karakuş mermer işletme tesislerinden, seramik atığı İnönü Üniversitesi, Geleneksel El Sanatları Merkezi, Seramik atölyesinden temin edilmiştir. ÇİMSA marka portland (42,5R) çimentosu, Barkisan marka kireç ve Abcr marka alüminyum tozu ticari olarak sağlanmıştır. Atık ve ham maddeler tedarik edildikten sonra ilk olarak Hekimhan Mehmet Emin Sungur MYO maden laboratuvarında bulunan Mertler marka çeneli kırıcıda, sonra merdaneli kırıcıda kırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kırma işleminden sonra Ünal marka bilyalı değirmende ham madde ve atıklar öğütülmüştür. Malzemeler 150 µm luk eleklerde elenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 de çeneli kırıcı, merdaneli kırıcı, bilyalı değirmenler ve eleme cihazına ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.1 : Gaz beton üretiminde kullanılan çeneli kırıcı (a), merdaneli kırıcı (b), bilyalı değirmenlere (c, d) ait görüntü.



Şekil 3.2 : Eleme cihazına ait görüntü.

Gaz betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarında bulunan Radwag marka hassas terazi, piknometre, testere, Mikrotest marka etüv, Proter marka mikser, Nüve OT 40L marka otoklav ve beton kalıpları kullanılmıştır. Şekil 3.3 de gaz beton üretiminde kullanılan etüv, otoklav, mikser ve beton kalıplarına ait görüntü verilmiştir.



Şekil 3.3 : Gaz beton üretiminde kullanılan etüv (a), otoklav (b), mikser (c), beton kalıplarına (d) ait görüntü.

3.1.1 Atıklar

Çalışma kapsamında çeşitli endüstriyel ve madensel atıklar kullanılarak farklı karışım oranlarında gaz beton numuneleri hazırlanmıştır. Çalışmada atık olarak kullanılan malzemeler olan cam, seramik, mermer ve granit atığı, kuvars yerine %10-20-30-40-50 oranlarında ikame edilerek gaz beton örnekleri üretilmiştir. Şekil 3.4 de gaz beton üretiminde kullanılan atıkların görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.4 : Gaz beton üretiminde kullanılan atıkların görüntüsü.

Atık cam malzeme

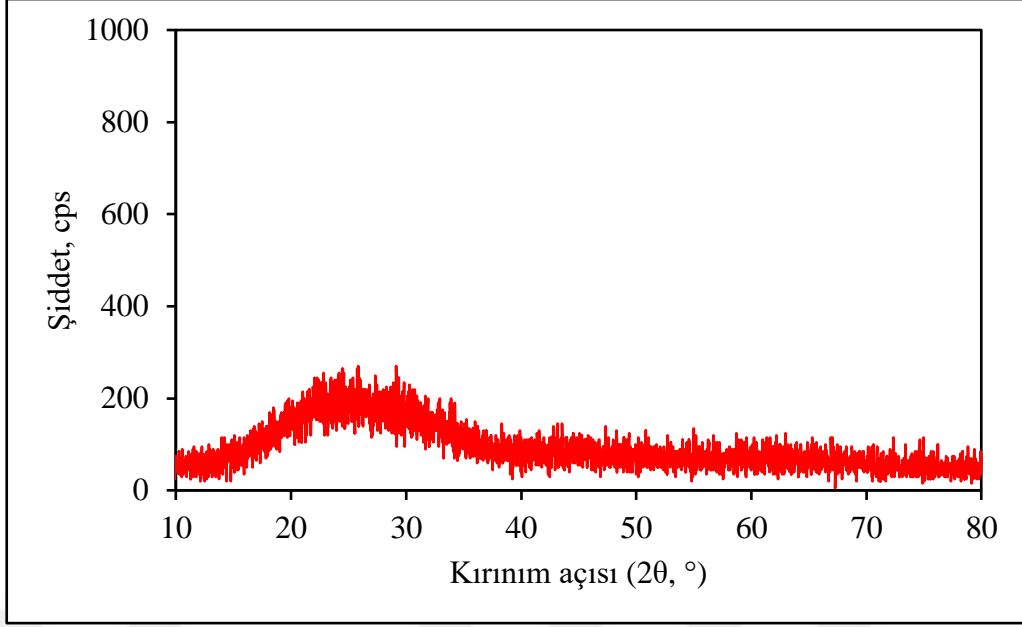
Cam atıklar şişe, pencere, ampul vb şeklinde çeşitliliğe sahiptir. Her bir cam atığın özellikleri birbirinden farklıdır. Çalışmada kullanılan cam atıkların farklı çeşitlerde olmamasına dikkat edilerek birbirine yakın fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmaları nedeniyle düz pencere cam atıkları tercih edilmiştir. Bu camların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin birbirine yakın olması anlamına gelmektedir. Parça şeklinde temin edilen atıklar çekiçle kırılıp, ufalanmış, bilyalı değirmende öğütülmüştür. 150 µm luk elekten elenen atık malzeme, analizler ve karışım için hazır hale getirilmiş, gaz beton üretmek için kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan atık cam malzemenin XRF analizi ile belirlenen kimyasal birleşimi Çizelge 3.1 de, XRD analizi ile belirlenen mineralojik bileşimi Şekil 3.5 de, Taramalı elektron mikroskobu ile alınan SEM görüntüsü Şekil 3.6 da verilmiştir.

Çizelge 3.1: Gaz beton üretiminde kullanılan cam atığının kimyasal bileşimi.

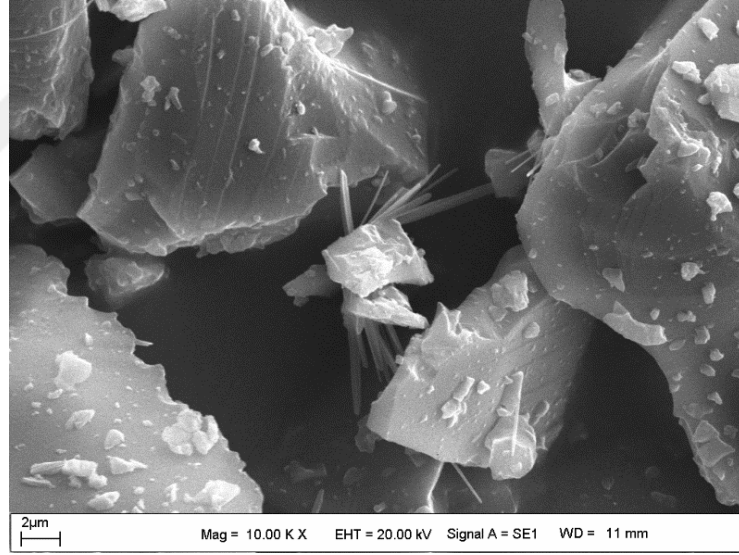
Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	K.K
(%)	68,492	0,996	0,309	10,371	3,744	13,495	0,9	0,27	1,35

Çizelge 3.1 incelendiğinde cam atığının ana bileşen olarak SiO₂ %68,49 içerdiği, %13,49 Na₂O, %10,37 ile CaO izlediği, kızdırma kaybı değerinin %1,35 ile oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 3.5 kullanılan cam atığın X-ışını kırınımı (XRD) desenini göstermektedir. XRD analiz sonucuna göre cam atığının amorf bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3.6 daki SEM görüntüsünde ise köşeli ve iğnemsî taneler görünmektedir.

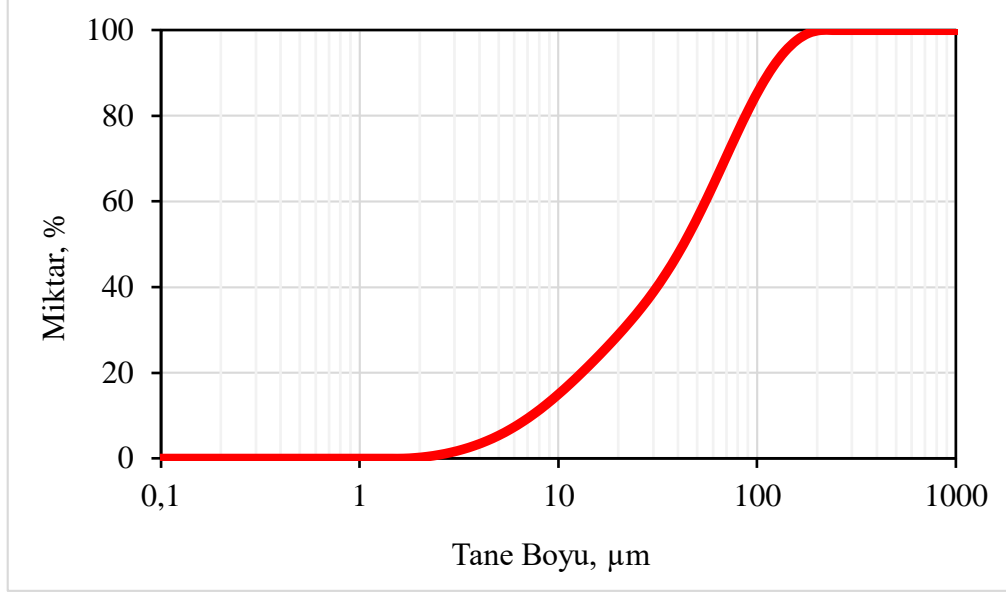


Şekil 3.5 : Cam atığına ait X-ışınları difraktogramı.



Şekil 3.6 : Cam atığına ait SEM görüntüsü.

Çalışmada kullanılan cam atığının tane boyut analizi Malvern Mastersizer-X 2000 cihazı ile belirlenmiş, kümülatif elek altı eğrisi Şekil 3.7 de verilmiştir.



Şekil 3.7 : Cam atığının kümülatif elek altı eğrisi.

Şekil 3.7 de verilen cam atığına ait kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde cam atığının d_{50} değeri: 48,9 μm , d_{90} değeri 131,7 μm olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2 de cam atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Cam atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.

	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)
Cam Atığı	2,72	1120

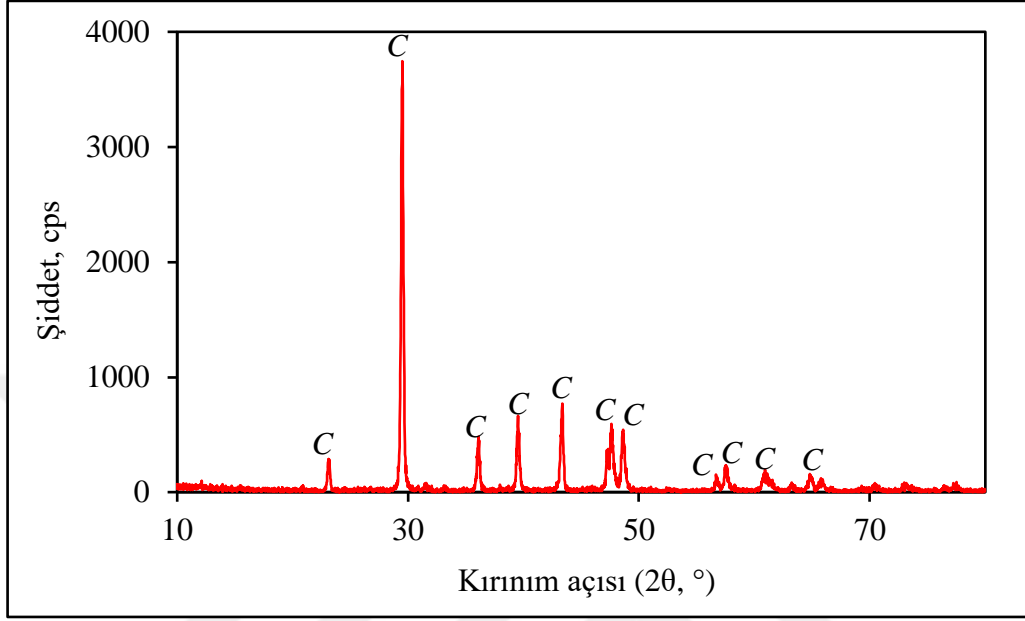
Atık mermer malzeme

Bu çalışmada kullanılan mermer atıklar organize sanayi bölgesinde bulunan Karakuş mermer işleme tesisinden, mermerin kesim sonucu oluşan tozlarından alınmıştır. Mermer atığının kimyasal bileşimi Çizelge 3.3 de verilmiştir. Çizelge 3.3 incelendiğinde mermer atığının ana bileşeninin %53,7 oranı ile CaO olduğu görülmektedir. Kızdırma kaybı değeri %42,636 ile oldukça yüksektir. Bileşiminde yüksek oranda CaCO_3 bulunan malzemelerde yüksek sıcaklığa maruziyet neticesinde CO_2 ve diğer organik malzemeler, gaz forma geçip uzaklaşmakta bu durum kütle kaybının meydana gelmesine neden olmaktadır.

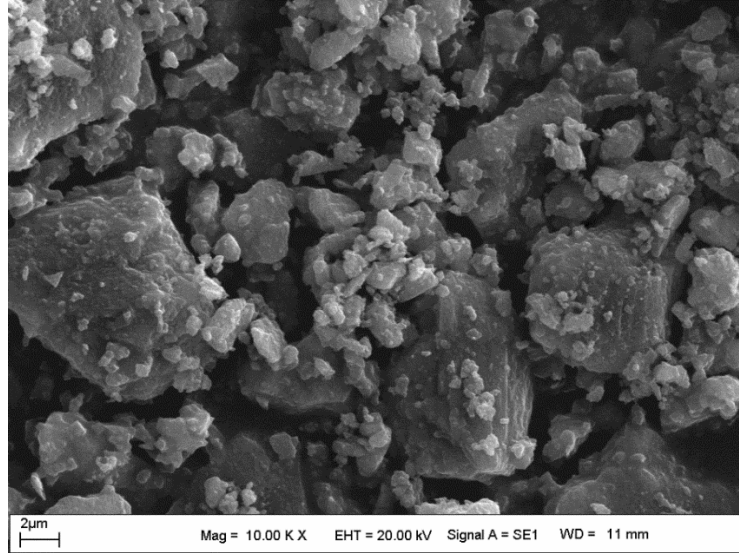
Çizelge 3.3 : Gaz beton üretiminde kullanılan mermer atığının kimyasal bileşimi.

Oksit	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	K.K
(%)	1,409	0,322	0,794	53,701	0,887	0,081	0,044	42,636

Şekil 3.8 kullanılan mermer atığın X-ışını kırınımı (XRD) desenini göstermektedir. Atık mermer tozunun XRD analizi sonucunda bünyede kalsit mineralinin ana bileşen olarak yer aldığı görülmüştür. Şekil 3.9 daki SEM görüntüsünde ise köşeli kalsit tanelerinin varlığı görülmektedir.

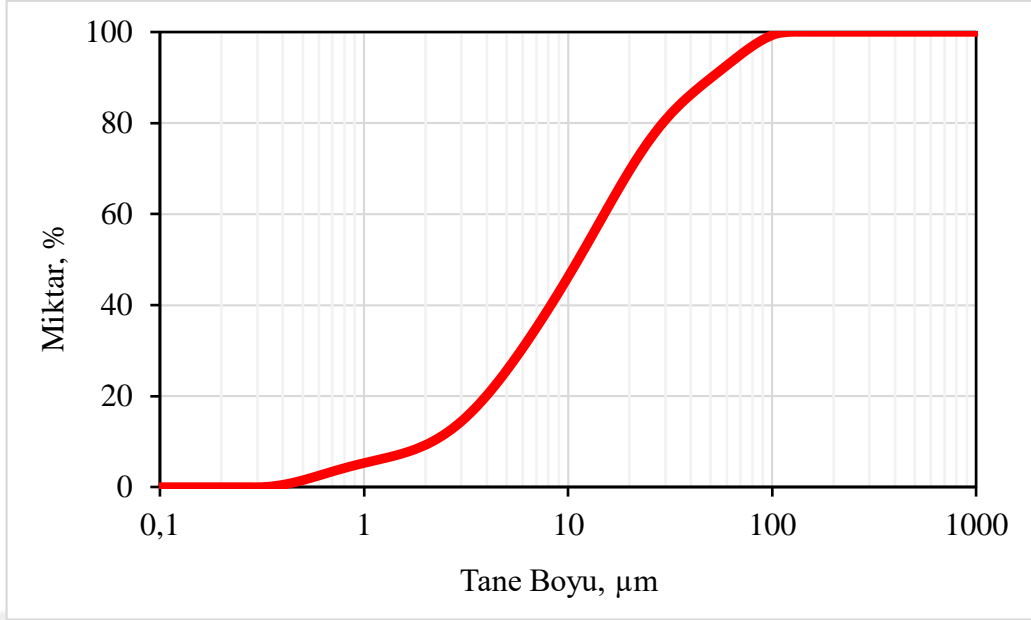


Şekil 3.8 : Mermer atığına ait X-ışınları difraktogramı (C:Kalsit).



Şekil 3.9 : Mermer atığına ait SEM görüntüsü.

Çalışmada kullanılan mermer atığının tane boyut analizi master sizer tane boyu ölçüm cihazı ile belirlenmiş, mermer atığının kümülatif elek altı eğrisi Şekil 3.10 da verilmiştir.



Şekil 3.10 : Mermer atığının kümülatif elek altı eğrisi.

Şekil 3.10 da verilen mermer atığına ait kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde d_{50} değeri: 12,9 μm , d_{90} değeri 58,09 μm olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.4 de mermer atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Mermer atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.

	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)
Mermer Atığı	3,1	430

Atık seramik malzeme

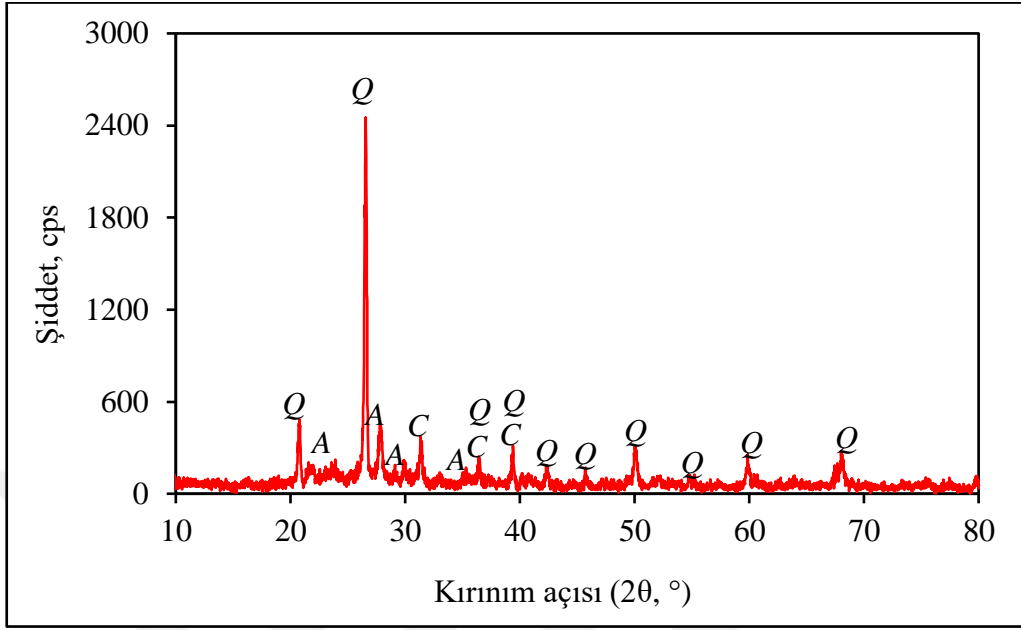
Çalışmada sırsız seramik atıkları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan seramik atıklar İnönü Üniversitesi, Geleneksel El Sanatları ve Uygulama Merkezi, Seramik Atölyesinden elde edilmiştir. Seramik atığının kimyasal bileşimi Çizelge 3.5 de verilmiştir. Çizelge 3.5 incelendiğinde seramik atığının ana bileşen olarak %54,9 SiO_2 içerdiği, bunu %24,9 oranıyla Al_2O_3 ve %13,64 ile CaO in izlediği, kızdırma kaybı değerinin de %2,11 ile oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.5 : Gaz beton üretiminde kullanılan seramik atığının kimyasal bileşimi.

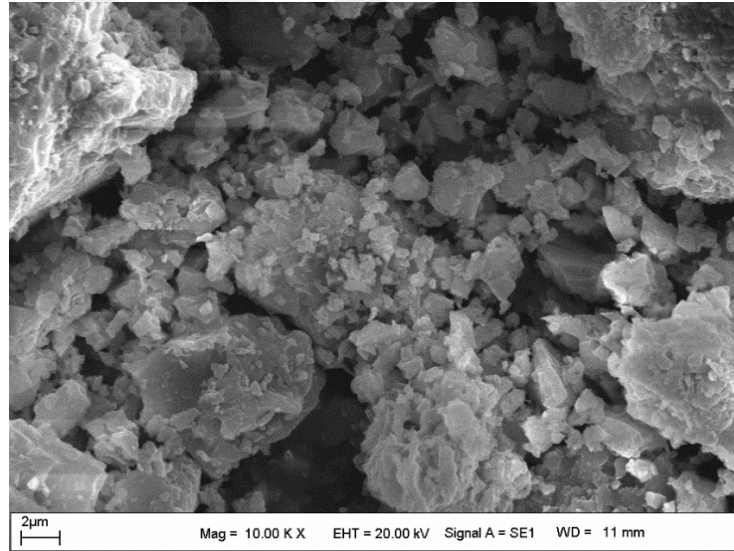
Oksit	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	K.K
(%)	54,901	24,904	1,051	13,645	0,367	0,361	0,648	0,952	2,119

Şekil 3.11 de kullanılan seramik atığının X-ışını kırınımı (XRD) deseni verilmiştir. Atık seramik tozunun XRD analizi sonucunda bünyede kuvars, kalsit ve anortit mineralinin ana

bileşen olarak yer aldığı görülmektedir. Şekil 3.12 deki SEM görüntüsünde ise köşeli taneler görünmektedir.

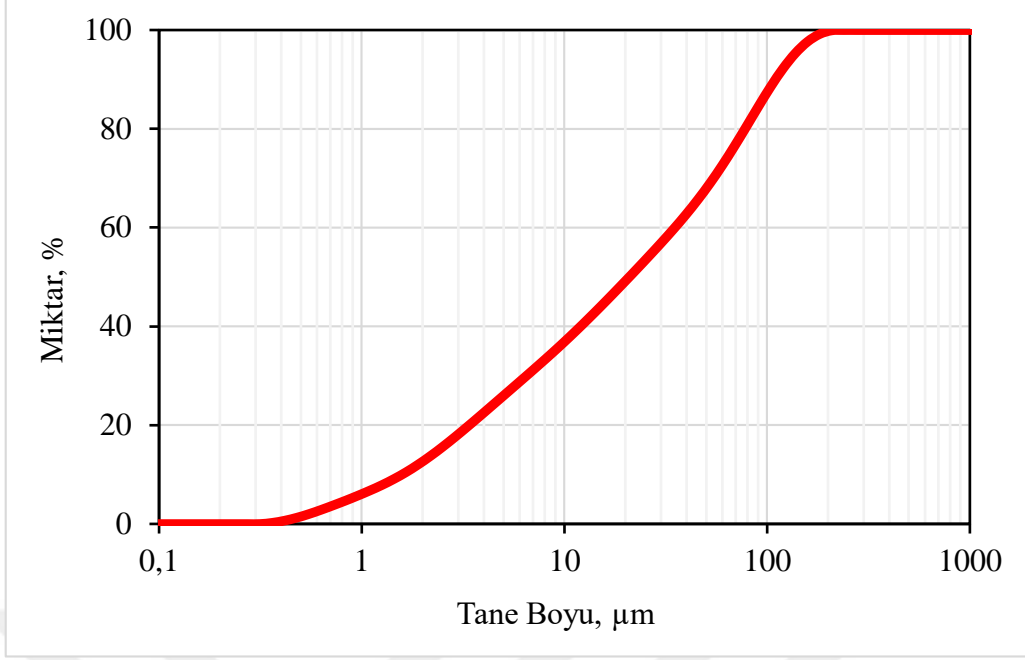


Şekil 3.11 : Seramik atığına ait X-ışınları difraktogramı (A:Anortit, C:Kalsit, Q:Kuvars).



Şekil 3.12 : Seramik atığına ait SEM görüntüsü.

Çalışmada kullanılan seramik atığının tane boyut analizi master sizer tane boyu ölçüm cihazı ile belirlenmiş, seramik atığının kümülatif elek altı eğrisi Şekil 3.13 de verilmiştir.



Şekil 3.13 : Seramik atığının kümülatif elek altı eğrisi.

Şekil 3.13 de verilen seramik atığına ait kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde d_{50} değeri: 24 μm , d_{90} değeri 126,4 μm olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.6 da seramik atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Seramik atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.

	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)
Seramik Atığı	2,94	3980

Atık granit malzeme

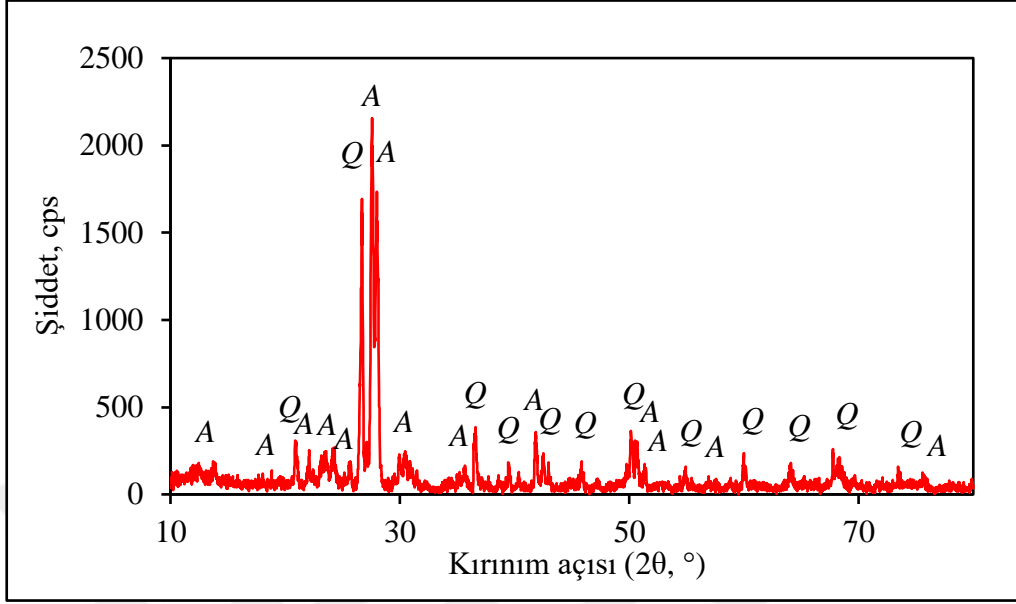
Bu çalışmada kullanılan granit atıkları, sanayi bölgesindeki Karakuş mermer işleme tesisinden, granitin işlenmesi sonucu oluşan tozlardan alınmıştır. Granit atığının kimyasal bileşimi Çizelge 3.7 de verilmiştir. Çizelge 3.7 incelendiğinde granit atığının ana bileşen olarak %66,5 oranında SiO_2 içerdiği, %13,94 oranında Al_2O_3 içerdiği, %5,66 oranı ile bunu K_2O nun izlediği, kızdırma kaybı değerinin %1,17 ile oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.7 : Gaz beton üretiminde kullanılan granit atığının kimyasal bileşimi.

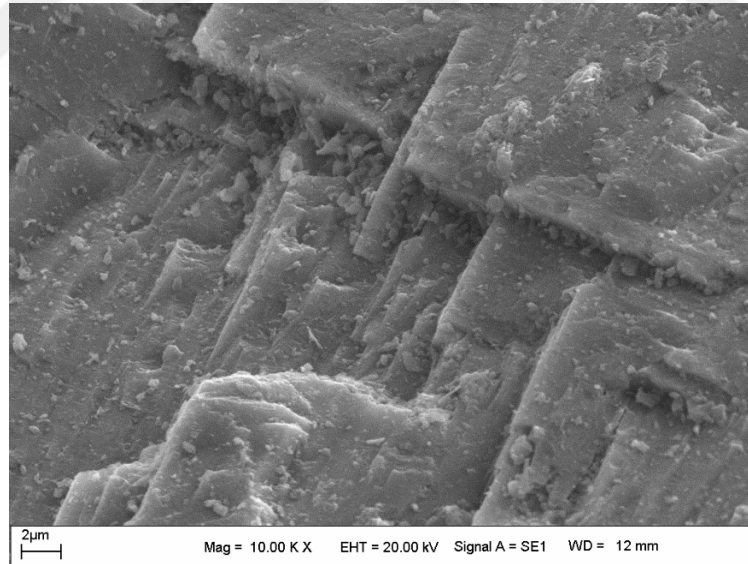
Oksit (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	K.K
	66,501	13,941	3,5	3,538	1,376	3,298	5,667	0,434	1,179

Şekil 3.14 kullanılan granit atığın X-ışını kırınımı (XRD) desenini göstermektedir. Atık granit tozunun XRD analizi sonucunda bünyede kuvars ve anortit mineralinin ana bileşen

olarak yer aldığı görülmüştür. Şekil 3.15 deki SEM görüntüsünde ise tabakalı iri taneli mineraller görünmektedir.

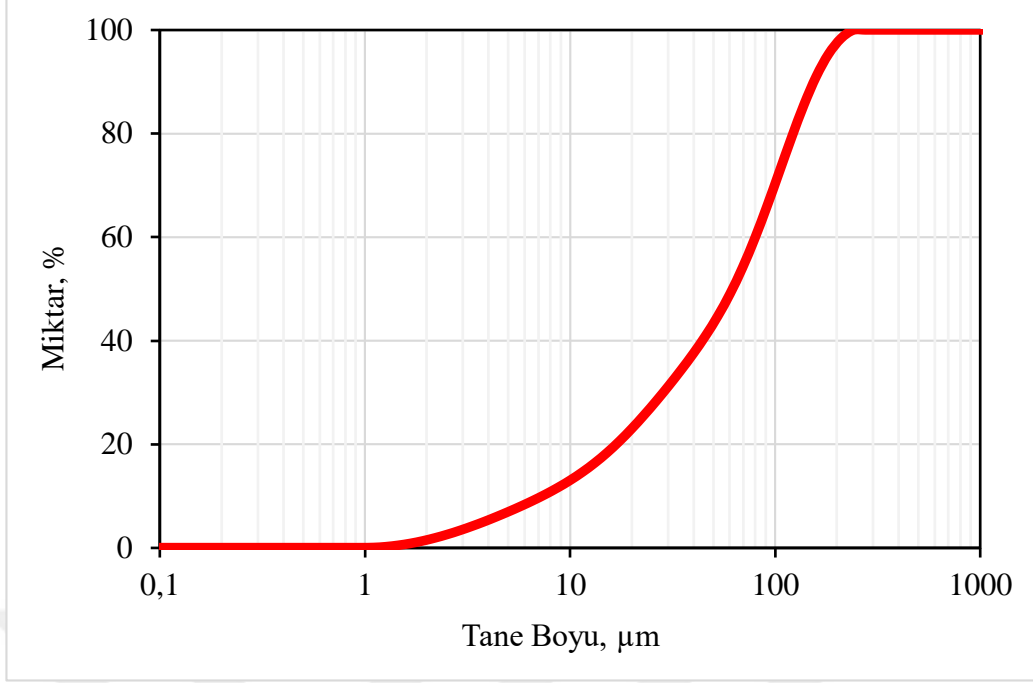


Şekil 3.14 : Granit atığına ait X-ışınları difraktogramı (A:Anortit, Q:Kuars).



Şekil 3.15 : Granit atığına ait SEM görüntüsü.

Çalışmada kullanılan granit atığının tane boyut analizi master sizer tane boyu ölçüm cihazı ile belirlenmiş, granit atığının kümülatif elek altı eğrisi Şekil 3.16 da verilmiştir.



Şekil 3.16 : Granit atığının kümülatif elek altı eğrisi.

Şekil 3.16 da verilen granit atığının kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde d_{50} değeri: 71,04 μm , d_{90} değeri 176,9 μm olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.8 de granit atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Granit atığına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.

	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)
Granit Atığı	2,88	1060

3.1.2 Kuvarsit

Gaz beton üretimi için kullanılan malzemelerden kuvarsitin belirli bir incelikte olması ve içerisindeki silis oranının yüksek olması gereklidir. Elazığ Erözsoy madencilige ait kuvarsit maden ocağı (Şekil 3.17) sahasından getirilen kuvarsit çeneli ve merdaneli kırıcıdan geçirilerek bilyalı değirmende öğütülmüştür.

150 μm luk elekte elenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.17 : Elazığ kuvarsit maden ocağı



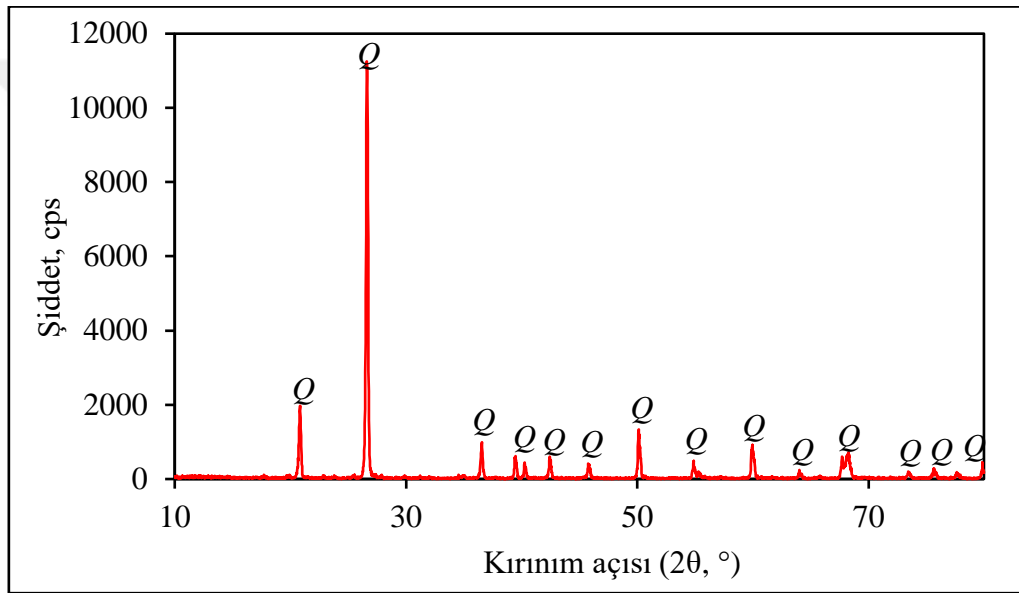
Şekil 3.18 : Gaz betonda kullanılan kuvarsit.

Kuarsitin kimyasal bileşimi Çizelge 3.9 incelendiğinde kuvarsitin ana bileşen olarak %91,2 oranında SiO₂ içerdiği, bunu %4,79 oranıyla Al₂O₃ ün izlediği, kızdırma kaybı değerinin %0,58 ile oldukça düşük olduğu görülmektedir.

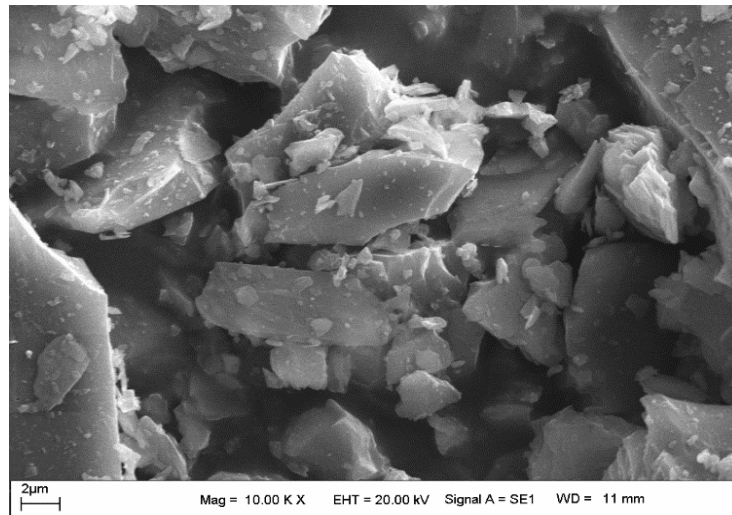
Çizelge 3.9: Gaz beton üretiminde kullanılan kuvarsitin kimyasal bileşimi.

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	K.K
(%)	91,202	4,795	0,657	0,182	0,271	0,206	1,717	0,174	0,584

Şekil 3.19 kullanılan kuvarsitin X-ışını kırınımı (XRD) desenini göstermektedir. Kuvarsitin XRD analizi sonucunda bünyesinde sadece kuvars mineralinin bulunduğu görülmektedir. Şekil 3.20 deki SEM görüntüsünde ise kuvarsit minerallerinin tane yapısı görünmektedir.

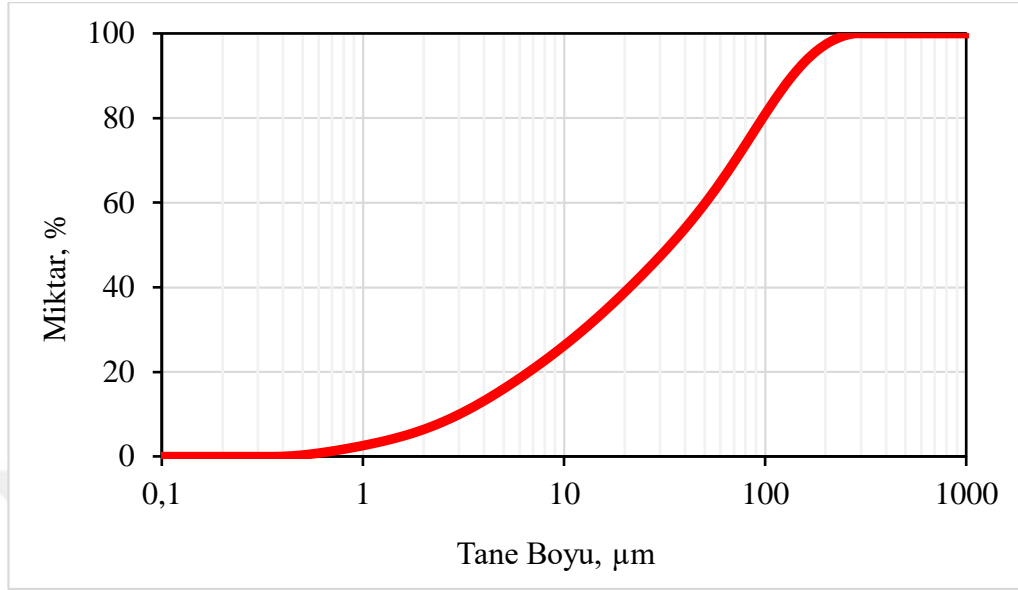


Şekil 3.19 : Kuvarsite ait X-ışınları difraktogramı (*Q:Kuvars*).



Şekil 3.20 : Kuvarsite ait SEM görüntüsü.

Çalışmada kullanılan kuvarsitin tane boyut analizi master sizer tane boyu ölçüm cihazı ile belirlenmiş, kuvarsitin kümülatif elek altı eğrisi Şekil 3.21 de verilmiştir.



Şekil 3.21 : Kuvarsite ait kümülatif elek altı eğrisi.

Şekil 3.21 de verilen kuvarsite ait kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde d_{50} değeri: 38,82 μm , d_{90} değeri 157,1 μm olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.10 da kuvarsite ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir.

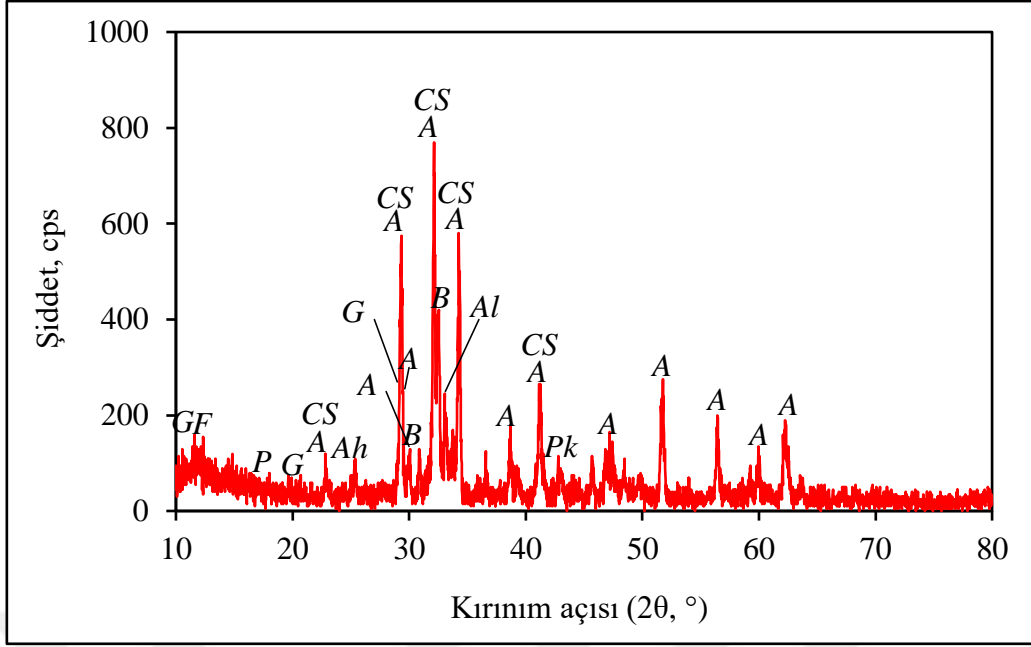
Çizelge 3.10 : Kuvarsite ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.

	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)
Kuvarsit	2,95	2530

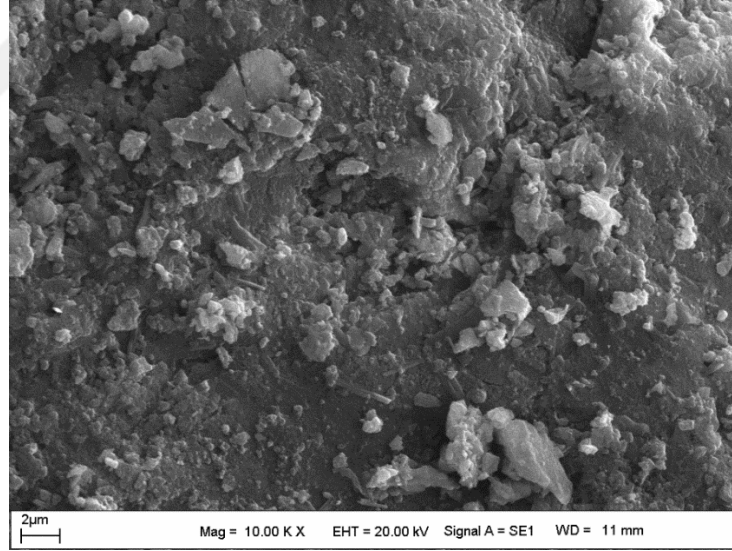
3.1.3 Çimento

Çalışmada Kayseri ÇİMSA Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş.'den alınan ÇİMSA marka CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. TS EN 197-1:2012 standardına göre sadece portland çimentosu klinkeri ve alçı taşından oluşmaktadır. Çimento bağlayıcı özellikleri ile yüksek, erken ve nihai mukavemet sağlamaktadır.

Şekil 3.22 kullanılan çimentonun X-ışını kırınımı (XRD) desenini göstermektedir. Çimentonun XRD analizi sonucunda bünyede kalsiyum silikat mineralinin ana bileşen olarak yer aldığı görülmüştür. Şekil 3.23 deki SEM görüntüsünde ise CS jelleri görünmektedir.

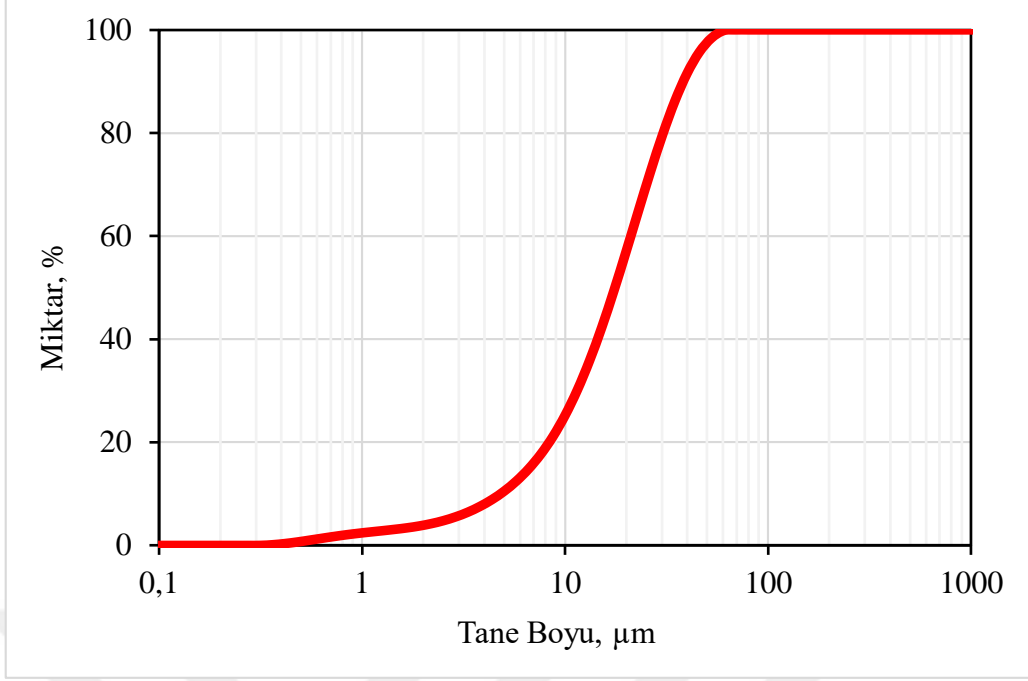


Şekil 3.22 : Çimentoya ait X-ışınları difraktogramı (A:Albit, B:Belit, G:Jips, F:Ferrit, P:Portlandit, Ah:Anhidrit, Pk:Periklas, Al:Aluminat, CS:Kalsiyum Silikat).



Şekil 3.23 : Çimentoya ait SEM görüntüsü.

Çalışmada kullanılan çimentonun tane boyut analizi master sizer tane boyu ölçüm cihazı ile belirlenmiş, çimentonun kümülatif elek altı eğrisi Şekil 3.24 de verilmiştir.



Şekil 3.24 : Çimentoya ait kümülatif elek altı eğrisi.

Şekil 3.24 de verilen çimentoya ait kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde d_{50} değeri: 20,16 μm , d_{90} değeri 43,78 μm olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.11 de çimentoya ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.11 : Çimontaya ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.

	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)
Çimento	3,19	220

3.1.4 Alçı taşı

Çalışmada kullanılan alçı taşı, Malatya Hekimhan ilçesi Yağca köyü yakınlarında bulunan Kolin Hekimhan madencilğe ait alçı taşı sahasından temin edilmiştir. Alçı taşı öğütülerek boyutu 150 μm 'nin altına indirilmiştir. Alçı taşının kimyasal analizi Çizelge 3.12 de, genel görüntüsü Şekil 3.25 de verilmiştir.



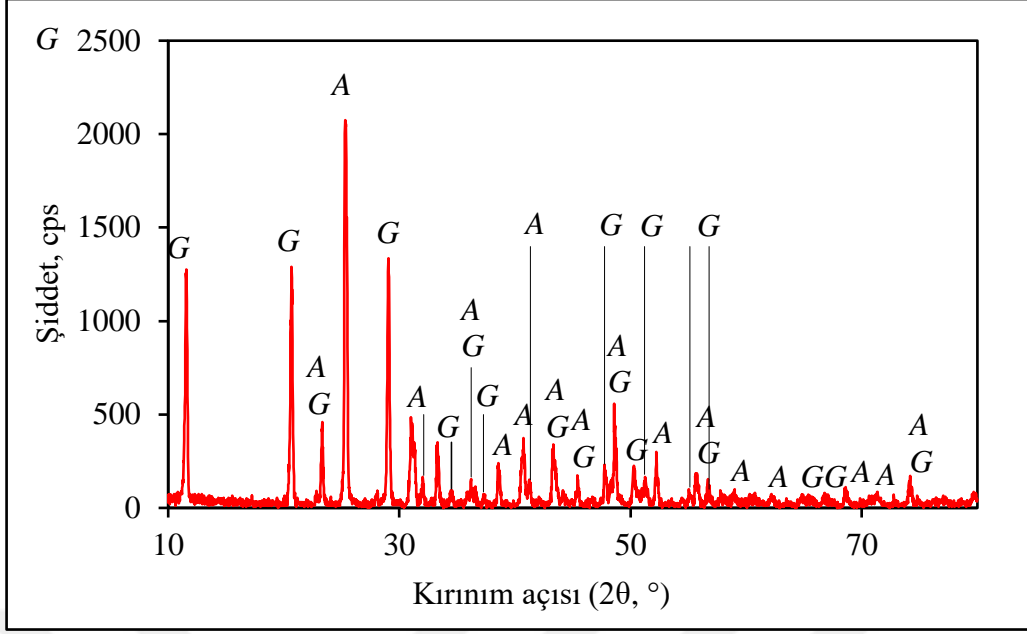
Şekil 3.25 : Gaz betonda kullanılan alçı taşı.

Çizelge 3.12 incelendiğinde alçı taşının ana bileşen olarak %46,99 oranında SO_3 içerdiği, bunu %44,21 oranı ile CaO in izlediği, kızdırma kaybı değerinin %6,49 ile düşük olduğu görülmektedir.

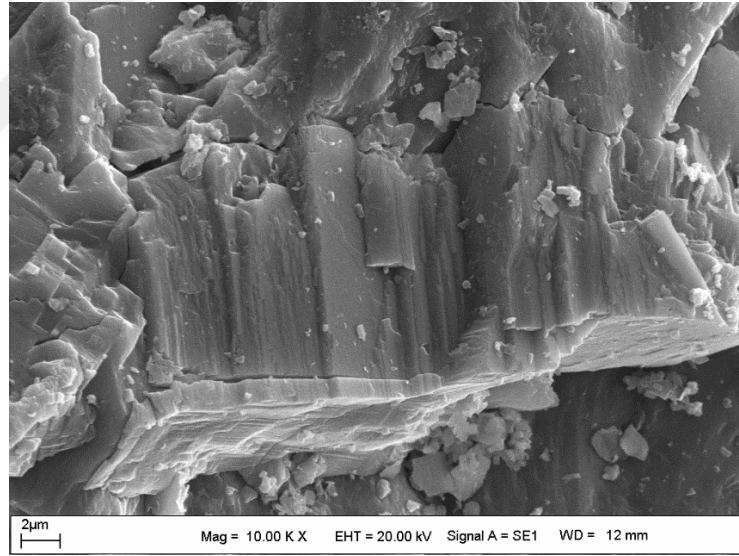
Çizelge 3.12 : Gaz beton üretiminde kullanılan alçı taşının kimyasal bileşimi.

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SrO	SO ₃	K.K
(%)	0,635	0,103	0,128	44,217	0,837	0,148	0,910	46,999	6,491

Şekil 3.26 kullanılan alçı taşı X-ışını kırınımı (XRD) desenini göstermektedir. Alçı taşının XRD analizi sonucunda bünyede alçı taşı ve anhidrit mineralinin ana bileşen olarak yer aldığı görülmüştür. Şekil 3.27 deki SEM görüntüsünde ise prizmatik alçı taşı taneleri görünmektedir.

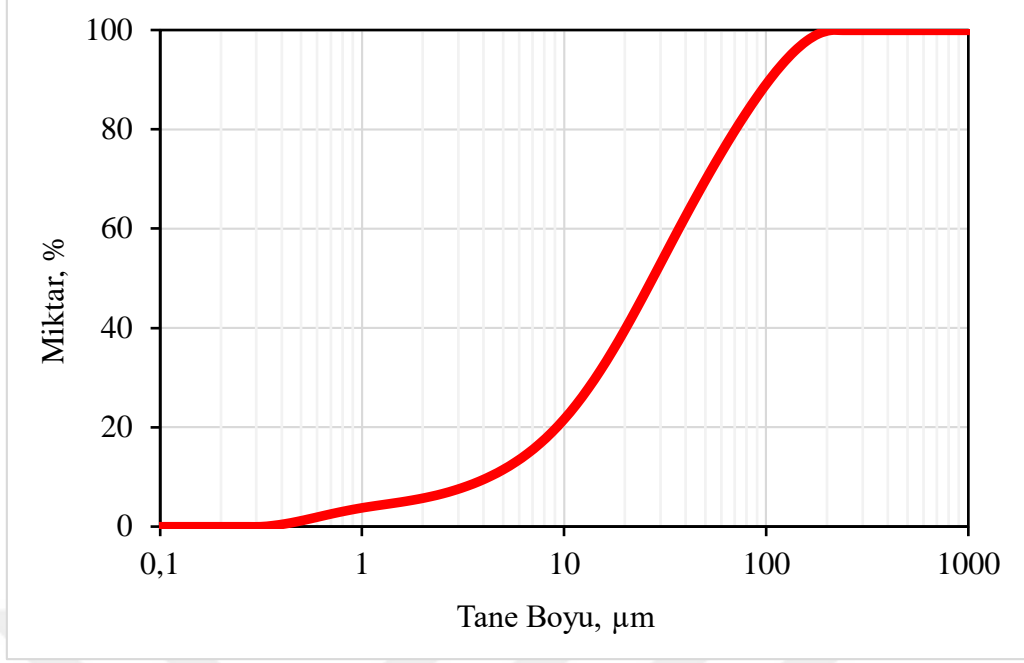


Şekil 3.26 : Alçı taşına ait X-ışınları difraktogramı (G:Alçı taşı, A:Anhidrit).



Şekil 3.27 : Alçı taşına ait SEM görüntüsü.

Çalışmada kullanılan alçı taşının master sizer tane boyu ölçer ile yapılan tane boyut analizi sonucunda elde edilen kümülatif elek altı eğrisi Şekil 3.28 de verilmiştir.



Şekil 3.28 : Alçı taşına ait kümülatif elek altı eğrisi.

Şekil 3.28 de verilen alçı taşına ait kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde d_{50} değeri: 31,5 μm , d_{90} değeri 119,17 μm olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.13 de alçı taşına ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.13 : Alçı taşı ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.

	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)
Alçı taşı	2,33	3230

3.1.5 Kireç

Çalışmada ticari olarak satılan Barkisan marka TS EN 459 söndürülmüş kireç kullanılmıştır (Şekil 3.29). Kirecin kullanılmasının amacı, alüminyum tozu ile reaksiyona girerek H_2 gazı oluşturmaktır. Oluşan gaz, gözenek yapısının oluşumunu sağlar. Kirecin kimyasal bileşimi Çizelge 3.14 de verilmiştir.



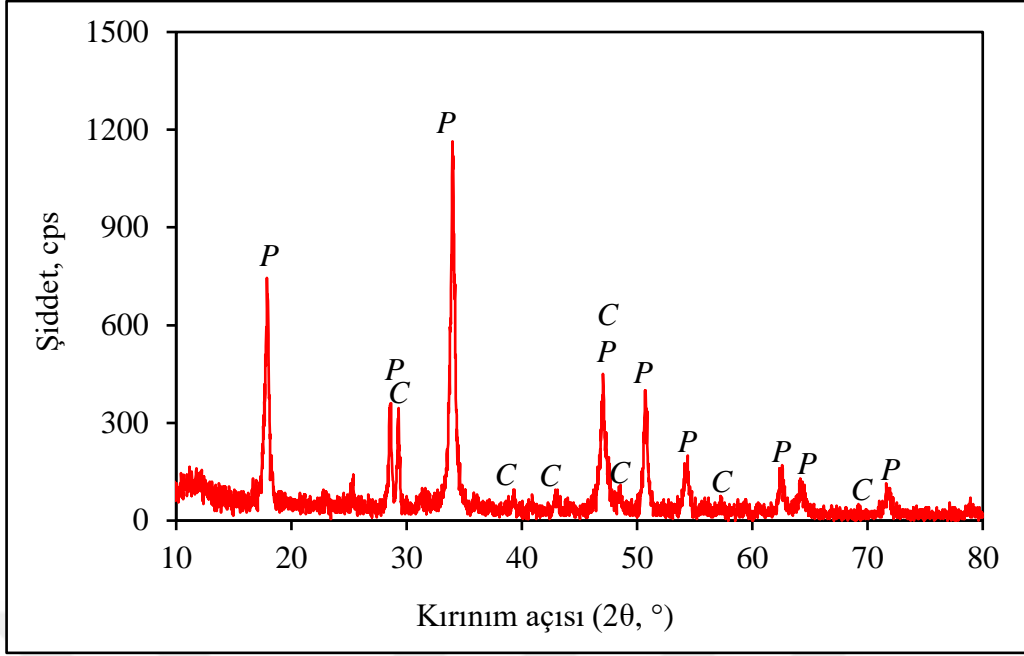
Şekil 3.29 : Gaz betonda kullanılan kireç.

Çizelge 3.25 incelendiğinde cam atığının ana bileşen olarak %69,81 oranında CaO içerdiği, bunu %1,13 ile SO₃ ün izlediği, kızdırma kaybı değerinin %26,29 ile yüksek olduğu görülmektedir.

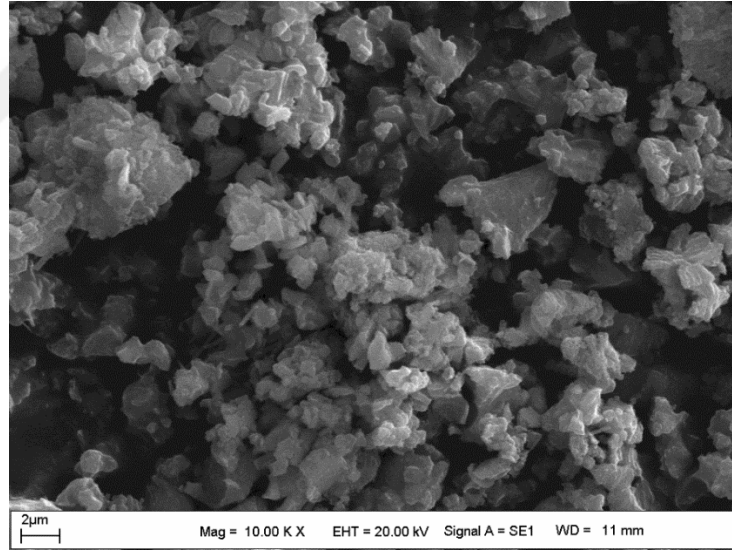
Çizelge 3.14 : Gaz beton üretiminde kullanılan kirecin kimyasal bileşimi.

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	K.K
(%)	0,704	0,249	0,304	69,817	1,13	1,319	0,124	26,299

Şekil 3.30 da kullanılan kirecin X-ışını kırınımı (XRD) desenini göstermektedir. Kirecin XRD analizi sonucunda bünyede portlandit ve kalsit minerallerinin ana bileşen olarak yer aldığı görülmüştür. Şekil 3.31 deki SEM görüntüsünde ise taneli portlandit minerallerinin varlığı görülmektedir.

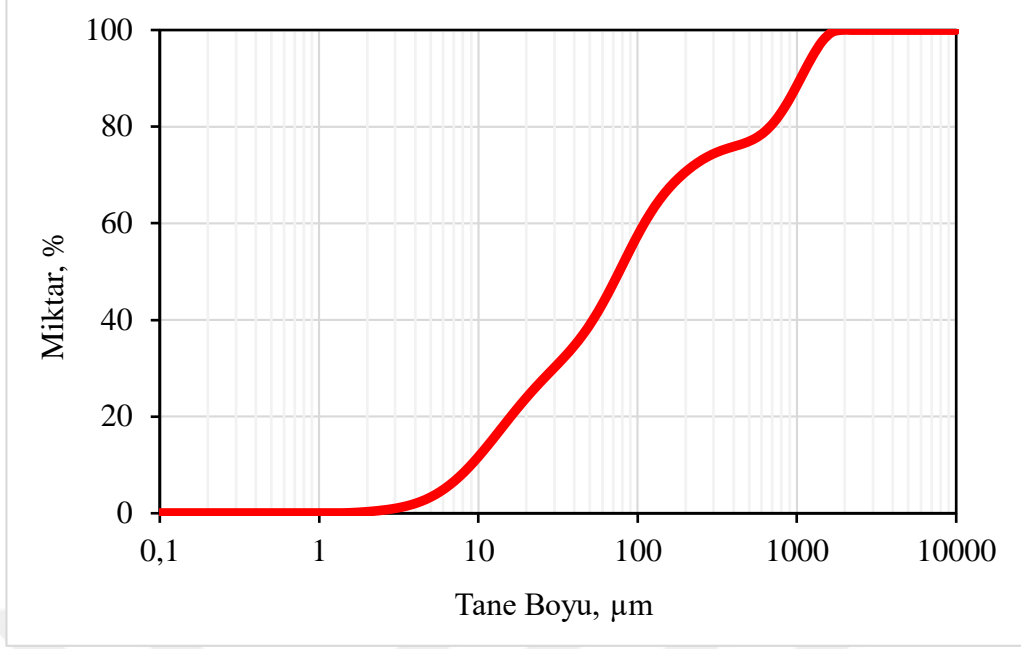


Şekil 3.30 : Kirece ait X-ışınları difraktogramı (*P:Portlandit, C:Kalsit*).



Şekil 3.31 : Kirece ait SEM görüntüsü.

Kirecin tane boyut analizi master sizer tane boyu ölçer ile belirlenmiş, kirecin kümülatif elek altı eğrisi Şekil 3.32 de verilmiştir.



Şekil 3.32 : Kirece ait kümülatif elek altı eğrisi.

Şekil 3.32 de verilen kirece ait kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde d_{50} değeri: 88,22 μm , d_{90} değeri 1214,72 μm olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.15 de kirece ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.15 : Kirece ait özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı değerleri.

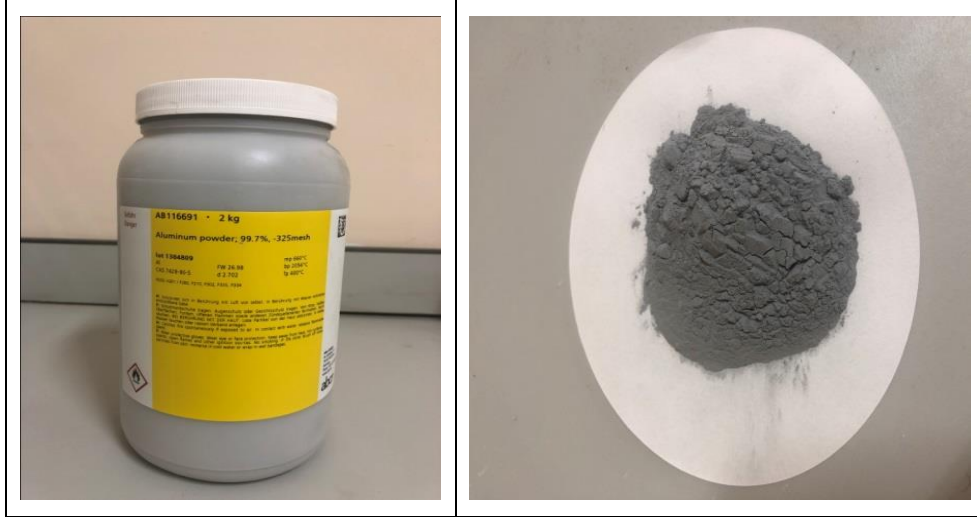
	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)
Kireç	2,09	924

3.1.6 Alüminyum tozu

Alüminyum toz halinde alındığından bir işleme tabi tutulmadan direkt olarak su ile alüminyum süspansiyonunu hazırlanarak kullanılmıştır. Alüminyum tozu Abcr marka, %99,7 saflıkta, -325 mesh (-44 μm) boyutundadır.

Gaz betonda kabarmayı sağlayıcı alüminyum tozunun, karışımda hacim artışını kireç ile yapmış olduğu reaksiyon sağlar.

Gaz beton üretiminde yaklaşık olarak alüminyum ve karışım suyu 1/3,75 oranında karıştırılarak alüminyum süspansiyon yapılmıştır. Şekil 3.33 de kullanılan alüminyum tozu görüntüsü verilmiştir.



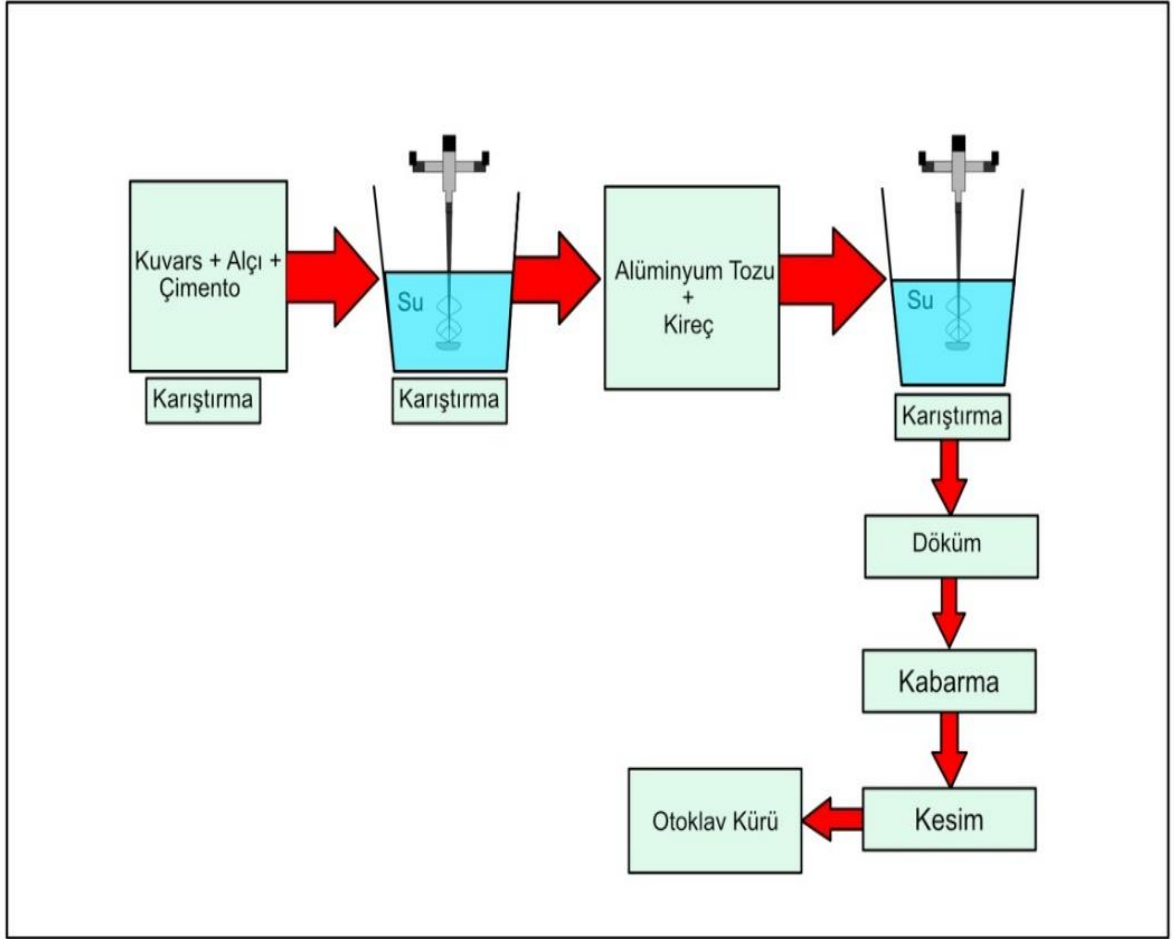
Şekil 3.33 : Gaz betonda kullanılan alüminyum tozu.

3.1.7 Su

İnönü Üniversitesi yerleşke içme suyu çalışmada kullanılmıştır. Kullanılacak suyun içilebilir özellikte ve temiz olması gerekmektedir.

3.2 Yöntem

Bu araştırmada, endüstriyel (cam, seramik) ve madensel (mermer, granit) atıkların gaz beton üretiminde ham madde olarak kullanılan kuvarsit yerine ikamesinin mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Tasarlanan üretim şeması Şekil 3.34 de gösterilmiştir.



Şekil 3.34 : Deney numunelerinin üretim şeması.

3.2.1 Gaz beton üretimi

Çalışmada gaz beton üretimi yapmak için bazı endüstriyel ve madensel atıklar (Cam, Seramik, Mermer, Granit), ham madde olarak kullanılan kuvarsit yerine %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ikame edilerek 6 farklı seride gaz beton örnekleri üretilmiştir. Kontrol numunesi (A) atık malzeme kullanılmadan üretilmiş, diğer serilerde hazırlanan örneklerin özellikleri bu numuneye göre kıyaslanmıştır. Bu serilerde kullanılan tüm malzemelerin karışım oranları Çizelge 3.16 da verilmiştir.

Çizelge 3.16 : Deneyde kullanılan malzeme ve 1 m³ gaz beton karışım oranları.

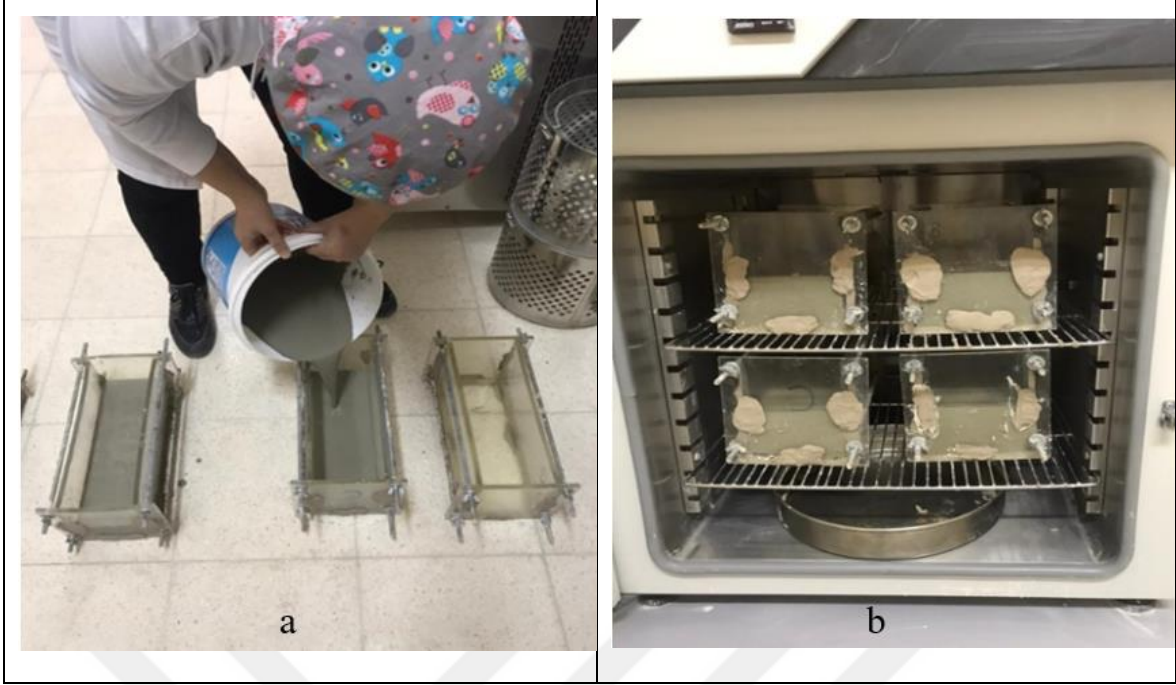
Gaz beton karışım oranları (1 m ³)								
Seri	Atık oranı %	Kuvarsit (kg)	Atık (kg)	Çimento (kg)	Alçı Taşı (kg)	Kireç (kg)	Al Tozu (kg)	Su/ Katı
Kontrol Numunesi (A)	0	200	0	100	20	40	0,4	0,70
1	10	180	20	100	20	40	0,4	0,70
2	20	160	40	100	20	40	0,4	0,70
3	30	140	60	100	20	40	0,4	0,70
4	40	120	80	100	20	40	0,4	0,70
5	50	100	100	100	20	40	0,4	0,70

Üretim sürecinde önce kuvars, atık malzeme, çimento ve alçı mikserle kuru olarak 2 dakika karıştırılmıştır. Kullanılacak suyun 2/3 ü karışıma ilave edilerek 2 dakika daha karıştırılmış ve homojen karışım haline getirilmiştir (Şekil 3.35).



Şekil 3.35 : Deney numunelerinin hazırlanıp karıştırma aşaması.

Daha sonra kireç, alüminyum tozu ve suyun geri kalanı karışıma katılarak bekletilmeden 1 dakika süre ile karıştırılmıştır. Homojen hale gelen akıcı kıvamdaki gaz beton harcı bekletilmeden ve homojenliği bozulmadan kalıplara dökülmüştür. Kalıplar nemli etüve yerleştirilerek 75 °C de yaklaşık 24 saat süre ile bekletilmiştir. Etüvde bu sıcaklıkta kalıplardaki gaz beton harcının reaksiyona girerek kabarması (genleşme) ve reaksiyonunu tamamlaması yaklaşık ilk 30 dakikada tamamlanmaktadır (Şekil 3.36).



Şekil 3.36 : Deney numunelerinin döküm (a) ve genleşme (b) aşaması.

Etüvde 24 saat kaldıktan sonra kalıplar laboratuvar ortamına alınarak numuneler kalıptan çıkarılmış ve kesilmiş, 135 °C de, 2,3 bar buhar basıncında 20 saat süre ile kür edilmiştir. Kürleme işleme için Nüve marka otoklav kullanılmıştır. Buhar küründen çıkan ürünler Şekil 3.37 de görüldüğü gibi hafif, gözenekli ve dayanımlı hale gelmiştir.



Şekil 3.37 : Deney numunelerinin kürlenme aşaması (a,b) ve nihai ürün (c,d).

Kür işlemi tamamlanan gaz beton numuneleri üzerinde birim hacim ağırlık, porozite, su emme, kapiler su emme, nem içeriği, basınç dayanımı, ultrasonik dalga hızı deneyleri, ısı iletkenlik deneyleri yapılarak atık katkısının etkinliği araştırılmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde SEM, XRF, XRD gibi analizlerle yapıları incelenmiştir. Nihai ürün ve gözenek görünümü Şekil 3.38 de verilmiştir. Gözeneklerin birbirinden bağımsız, küresele yakın biçimde olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan gözenek boyutları 0,5-50 mm aralığında değişmektedir.



Şekil 3.38 : Nihai ürünler ve gözenek görünümü.

3.2.2 Gaz beton örneklerinin kimyasal-mineralojik özellikleri

Gaz beton örneklerinin kimyasal bileşimlerini belirlemek için XRF analizi, mineralojik bileşimini belirlemek için XRD, mikro yapısal özelliklerin belirlenmesi için SEM analizi yapılmıştır.

3.2.2.1 Elementel analiz (XRF)

Çalışmada kullanılan atıklar, kuvars, alçı taşı, kirecin elementel analizi (XRF), Afyon Kocatepe Üniversitesi Doğaltaş Analiz Laboratuvarında RIGAKU/ZSX PRIMUS 2 marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Malzemeler analize uygun hale getirilmek için önce çeneli kırıcıdan, sonra merdaneli kırıcıdan geçirilmiş, bilyalı değirmende öğütüldükten sonra 150 µm elekten elenerek hazırlanmıştır.

3.2.2.2 X-ışını kırınımı analizleri (XRD)

İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi İBTAM'da XRD analizleri yaptırılmıştır. Kristal malzemelerdeki değişik kristal yapıları (fazlar) veya kristal yapı parametrelerini tespit etmek için X-ışını kırınımı yöntemi kullanılır. Bu yöntemin temeli Bragg yansımalarına dayanmaktadır. Gönderilen X-ışını örnek üzerinden yansır (kırılır) ve bir detektör yardımıyla algılanan ışın software aktarılarak, yansıma şiddetine karşılık 2θ değerinde grafiğe geçirilir. Çalışmada kullanılan ham maddelerin ve üretilen gaz beton

örneklerinin mineralojik bileşimlerini belirlemek için malzemeler çeneli, merdaneli kırıcıdan geçirilip, değirmende öğütülmüş ve 150µm lik elekten elenerek hazırlanmıştır. X-ışınları analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile $CuK\alpha$ ($\lambda=1.5405 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak belirlenmiştir. Ölçümler için üretilen whiskerler pelet haline getirilmiş difraktometrenin örnek tutucusuna sabitlenerek ölçümler yapılmıştır. Ölçümler $2\theta=3-80^\circ$ arası $3^\circ/dk$ sabit hızla taranmıştır.

3.2.2.3 Taramalı elektron mikroskobu analizleri (SEM)

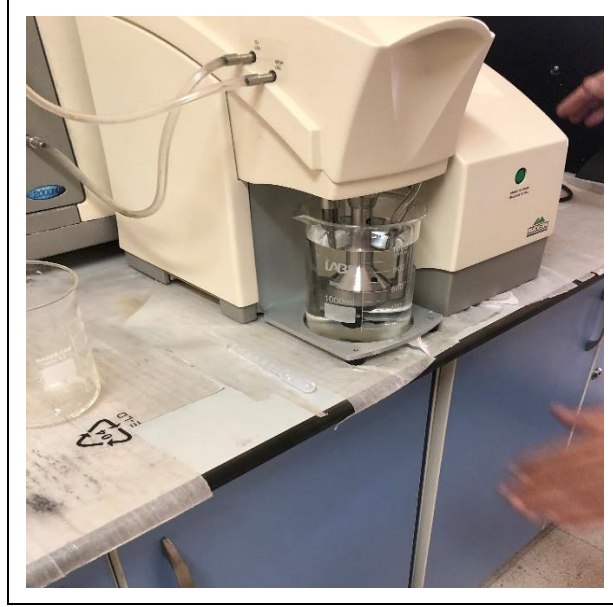
Elektron mikroskobu yüksek voltaj altında hızlandırılmış elektronların malzeme yüzeyine çarptırılıp yansıması prensibine dayanmaktadır. Bu yansıyan elektronlar ve buna bağlı olarak X-ışınları kullanılarak değişik analizler yapıp, yüzeyin topografisi elde edilir. Numunelerin mikro yapısal özelliklerinin analizleri için yüksek çözünürlüğe sahip taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Elektron mikroskobu görüntüleri doğrudan örneklerin dış yüzeyinden alınmıştır. Hazırlanan gaz beton örneklerinin taze yüzeylerinde temsili numuneler alınmış ve İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi İBTAM'da Leo Evo-40xVP model elektron mikroskobu ile SEM analizleri yaptırılmıştır. Elde edilen görüntülerden mikro yapısal özellikler incelenmiştir.

3.2.3 Gaz beton örneklerinin fiziksel-mekanik özelliklerin belirlenmesi

Hazırlanan gaz beton örneklerinin fiziksel- mekanik özelliklerinin belirlenmesi için birim hacim ağırlık, porozite, su emme, kapiler su emme, nem içeriği, basınç dayanımı, ultrasonik dalga hızı tayini deneyleri, gaz betonda kullanılan ham maddeler ile atıklar için tane boyut dağılımı ve özgül ağırlık tayini yapılmıştır.

3.2.3.1 Tane boyut dağılımı

Gaz beton üretiminde kullanılan hammaddeler ve atıkların tane boyut dağılımını belirlemek için uygulanmıştır. 3 adet numune destile su içinde manyetik karıştırıcıda 15 dakika ve ultrasonik karıştırıcıda 4 dakika karıştırıldıktan sonra cihazın otomatik ünitesine aktarılmış, burada %100 şiddetinde karıştırılarak lazer tekniği ile çalışan İnönü Üniversitesi, Maden Mühendisliği laboratuvarında bulunan Malvern Mastersizer-X 2000 cihazında tane boyut dağılımı analizine tabii tutulmuştur. Şekil 3.39 da Master sizer ile yapılan tane boyut ölçümü verilmiştir.



Şekil 3.39 : Master sizer ile tane boyut ölçümü

3.2.3.2 Özgül ağırlık tayini

Gaz beton ham maddeleri ve atıkların özgül ağırlıkları TS EN 1097-7 göre belirlenmiştir. Deney için malzemelerden yaklaşık 2 kg kadar parça numune alınmış, numuneler ilk olarak çeneli kırıcıdan, daha sonra çekiçli kırıcıdan geçirilerek boyut küçültme işlemi yapılmıştır. Daha sonra bilyalı değirmende öğütülerek 0,15 mm lik elek açıklığına sahip elekte elenmiştir. Temsili numunelerden konileme-dörtleme ve karelaj yapılarak 100'er gram malzeme alınarak, numune içerisindeki nemi uzaklaştırmak için 105 °C'lik etüvde değişmez kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Oda sıcaklığında saf su ile doldurulan 50 ml hacmine sahip piknometre, kapağı kapatıldıktan ve üzerindeki su damlaları kuru bir bezle alındıktan sonra 0,01 g hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır (Gps). Piknometre içindeki su boşaltılarak, etüvde kurutulup soğutulduktan sonra kapağı ile birlikte tartılmış ve ağırlığı not edilmiştir (Gp).

Kurutulup soğutulmuş olan numuneden yaklaşık 2,5 g kadar alınarak kuru bir huni yardımıyla piknometre içerisine boşaltılmış ve kapağı ile birlikte terazide tartılarak ağırlığı belirlenmiştir (Gpn). İçinde deney numunesi bulunan piknometre, hacminin ¼ üne kadar su ile doldurulmuş ve numunelerin taneleri içerisinde hava kabarcıklarının kalmaması için iyice çalkalanmış, daha sonra piknometre tamamen su ile doldurulmuştur. Kapağı kapatılıp, üzeri kurulandıktan sonra tartılmış, tartım sonucu kaydedilmiştir (Gpns). Özgül ağırlık değeri Eşitlik 3.1 kullanılarak belirlenmiştir [99].

$$d_o = \frac{G_{pn} - G_p}{(G_{pn} - G_p)(G_{pns} - G_{ps})} \quad (3.1)$$

Burada;

do: Numunenin özgül ağırlığı, (g/cm³)

Gpn: Piknometre + deney numunesi ağırlığı, (g)

Gp: Piknometre ağırlığı, (g)

Gpns: Piknometre + deney numunesi + su ağırlığı, (g)

Gps: Su ile dolu piknometre ağırlığı, (g)

3.2.3.3 Birim hacim ağırlık

Gaz beton örneklerinin birim hacim ağırlık değerleri TS EN 772-13 ve TS EN 771-4 göre belirlenmiştir. Gaz beton birimlerin net kuru birim hacim kütlesi, normalde 300-1000 kg/m³ arasındadır. Standartlara göre boyutları kumpas ile ölçülerek hacimleri bulunan deney numuneleri 105 °C ± 5 sıcaklığa ayarlanmış kurutma fırınına konularak değişmez kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutmanın son dört saatlik süresi içinde deney numunesinin kütlesinde %0,2 den fazla azalma görülmez ise bu kütle değişmez kütle olarak kabul edilmiştir. Deney numunesi kurutma fırınından çıkarıldıktan sonra bir desikatörde soğutulup hassas terazide tartılmıştır (W). Numunelerin birim hacim ağırlığı Eşitlik 3.2 kullanılarak belirlenmiştir [12,100].

Birim hacim ağırlığı :

$$\Delta = \frac{M}{V} \quad (3.2)$$

Bu formülde;

Δ = Birim hacim ağırlığı, (kg/m³)

W = Kurutulmuş deney numunesi kütlesi, (kg)

V = Deney numunesi hacmi, (m³)

3.2.3.4 Porozite tayini

Gaz beton numunelerinin porozite değerleri TS EN 772-4 de belirtilen şekilde yapılmıştır. Etüvde 105±5 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa kadar kurutulan gaz beton numuneler, ortam sıcaklığına kadar soğutulmuş ve kuru tartımları alınmıştır (G_k). Bu numuneler suya doygun hale getirilmiş, doygun haldeki ağırlıkları (G_d) belirlenmiştir. Numunelerin üç boyutu kumpas ile ölçülerek hacimleri belirlenmiştir. Tartımlar, 0,1 g duyarlıklı 4000 g kapasiteli

dijital terazide yapılmış, malzemelerin görünür porozitesi (hacimce su emme oranı) Eşitlik 3.3 kullanılarak belirlenmiştir [101].

$$N = \frac{G_d - G_k}{V} (\%) \quad (3.3)$$

Burada;

N: Porozite, (%)

G_d: Numunelerin doygun haldeki ağırlıkları, (g)

G_k: Numunelerin kuru ağırlıkları, (g)

V: Hacim, (cm³)

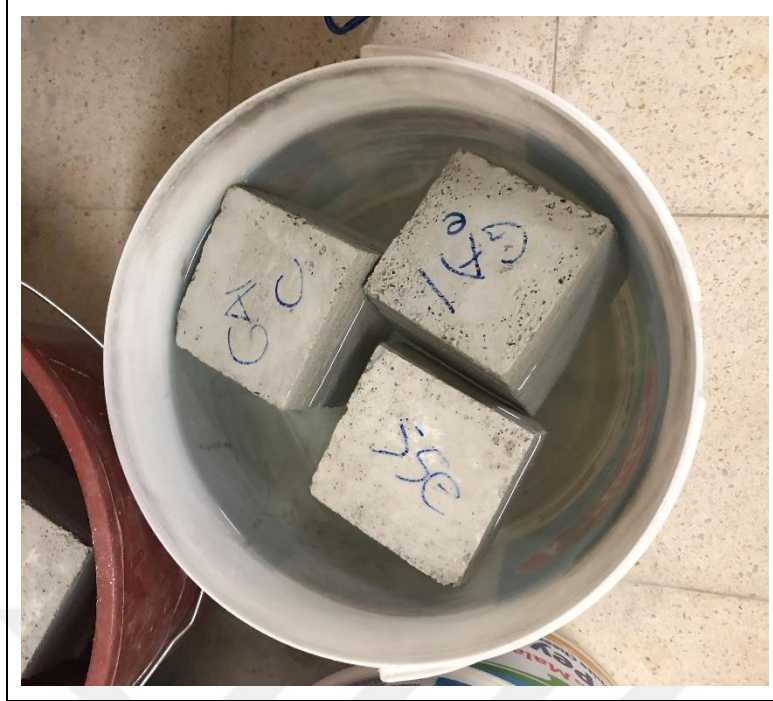
3.2.3.5 Su emme deneyi

Sertleşmiş betonun birim hacim ağırlık ve su emme oranları TS EN 771-4:2011+A1 e göre belirlenmiştir. Su emme deneyine tabii tutulacak numunelerin hacimleri hesaplanmış ve etüvden çıkan numunelerin ağırlıkları hassas terazide tartılarak belirlenmiştir. Su içerisinde 30-60-90 dakika ve bir gün bekletilen numuneler tartılarak ağırlıkça su emme değerleri Eşitlik 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 3.40 da su emme deneyi yapılan numuneler verilmiştir [12].

$$Su\ Emme = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 \quad (3.4)$$

m_1 = Kuru ağırlık, (g)

m_2 = Su içerisinde alandıktan sonraki ıslak ağırlık, (g)



Şekil 3.40 : Su emme deneyi.

3.2.3.6 Kapiler (kılcal) su emme tayini

Gaz beton numunelerinin kapiler su emme (kılcal) değerleri TS EN 772-11 de tanımlanan yöntemle göre belirlenmiştir. Deney için her bir numuneden düzgün geometriye sahip olanlar alınmış ve numunelerin su ile temas edecek yüzey alanları belirlenmiştir. Deney için kullanılacak numuneler etüvde (105 ± 5 °C de) değişmez kütleye ulaşmaya kadar kurutulmuş, dış ortamdan nem kapmaması için desikatör içerisinde oda sıcaklığına ulaşmaya kadar soğutulmuş tartılmıştır (M_d).

Numunelerin tabanının suya maruz kalacağı 5 mm lik mesafe numune üzerinde işaretlenmiştir. Boş su tankı içerisine numunelerin tabanından su alabilmesi için ızgara konulmuştur. Kapiler su emme deneyi yapılacak numuneler ızgaraya düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Numunelerin tabanı 5 ± 1 mm su içerisinde kalacak şekilde tanka su ilave edilmiştir. Su miktarı azaldıkça tankın içerisine su ilavesi yapılmıştır.

Kapiler su emme değerlerini belirlerken, numunelerin su ile temas ettikleri anda kronometre çalıştırılarak 1, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 480, 1440, 2880 ve 4320 dakikalardaki numune ağırlıkları (M_i) belirlenmiştir. Örneklerin kapiler su emme değerleri Eşitlik 3.5 yardımıyla belirlenmiştir. Şekil 3.41 de gaz beton numunelerinin kapiler su emme değerlerinin belirlenmesine ait görüntüler verilmiştir [102].

$$C_w = \frac{M_i - M_d}{A \sqrt{t_i}} \quad (3.5)$$

Burada;

Md: Numunenin kuru ağırlığı, (g)

A: Numunenin su ile temas ettiği yüzeyin alanı, (m²)

Mi: Belirli sürelerde kapiler su emmeye maruz kalan numunenin ağırlığı, (g)

ti: Suya batırma süresi, (s)

Cw: Kapiler su emme katsayısı, [g/(m².s^{0.5})]



Şekil 3.41 : Gaz beton numunelerin kapiler su emme değerlerinin belirlenmesi.

3.2.3.7 Nem içeriğinin belirlenmesi

Gaz beton numunelerinin nem içeriği değerleri TS EN 772-10 standartına göre belirlenmiştir. Nem içeriği, sabit kütleye ulaşıncaya kadar kurutulmuş numunenin, kurutulma esnasındaki kütle azalmasının, kurutulduktan sonraki kuru kütleye oranı olarak hesaplanır. 6 adet deney numunesi hazırlanmış, oda sıcaklığında tartılarak ölçümler ($M_{0,s}$) alındıktan sonra etüvde 105 °C de 24 saat kurutularak sabit kütleye getirilmiş, kuru ağırlık ölçümleri ($M_{dry,s}$) yapılmıştır [29].

Numunenin nem içeriği (W_s) değerleri, Eşitlik 3.6 a göre hesaplanır.

$$W_s = \frac{M_{0,s} - M_{dry,s}}{M_{dry,s}} * 100 \quad (3.6)$$

Burada:

W_s : Nem içeriği oranı, kütlece, (%)

$M_{o,s}$: Kurutulmadan önceki numune kütlesi, (g)

$M_{dry,s}$: Kurutulduktan sonraki numune kütlesi, (g)

3.2.3.8 Basınç dayanımı

Deney numuneleri TS EN 772-1 ve TS EN 771-4:2011+A1 standardına göre basınç dayanımı deneyine tabii tutulmuştur. Basınç dayanımı deneyi 3 adet 10x10x10cm ebatlarında deney numuneleri ile yapılmıştır. Deneyde kullanılacak örneklerin basınç uygulanacak yüzleri kumpas ile 1 mm hassasiyetle ölçülerek yüzey alanı tespit edilmiştir. Deney numuneleri otoklavdan çıkarıldıktan sonra boyutlandırılmış, 28 gün oda koşullarında bekletildikten sonra 105 °C de etüvde 24 saat kurutulmuştur (Şekil 3.42).



Şekil 3.42 : Basınç dayanımı için numuneleri kurutma işlemi.

Etüvden çıkartılarak 4 saat bekletildikten sonra numune, basınç dayanım deneyini yapmak üzere test cihazına Şekil 3.43 deki gibi yerleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyi, İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarında bulunan, Utest marka 200 kN kapasiteli basınç dayanım test cihazı ile yapılmıştır.

Deney sırasında yük, kabarma yönüne dik olarak uygulanmıştır. Gerilme artışı, 0,25 MPa/sn olacak şekilde sabit bir hızla, sürekli ve darbesiz olarak numune kırılıncaya kadar yüklenmiştir. Örneklerin basınç dayanım değerleri Eşitlik 3.7 kullanılarak hesaplanmıştır [12,103].

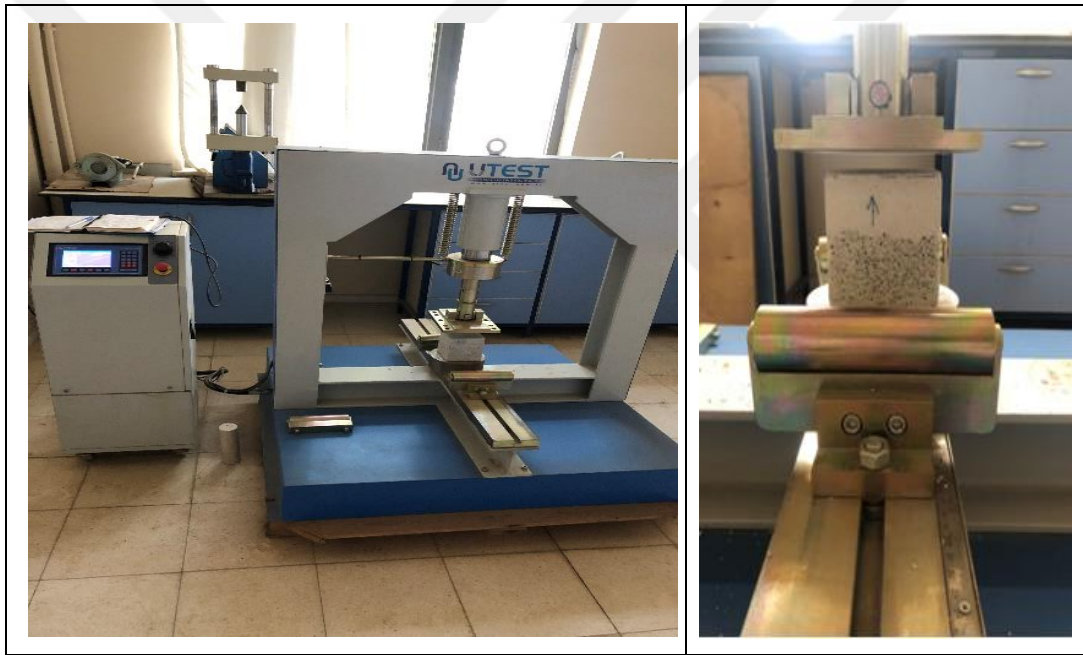
$$\sigma = \frac{F_i}{A_i} \quad (3.7)$$

Burada:

σ : N/mm² cinsinden basınç dayanım değeri

F_i : Kırılma anındaki maksimum yük

A_i : Yük uygulanan kesitin mm² olarak alanı



Şekil 3.43 : Tek eksenli basınç dayanımı ölçümü.

3.2.3.9 Ultrasonik dalga hızı deneyi

Gaz betonların ultrasonik dalga hızları TS EN 12504-4 tarafından belirtilen yöntemle göre belirlenmiştir. Ultrasonik dalga hızı ölçümlerinde Proceq marka ultrasonik hız ölçüm cihazı kullanılmıştır. Boyuna dalga hızlarını belirlemek için 54 kHz lik piezoelektriksel özellikte alıcı-verici probalar kullanılırken, enine dalga hızlarını belirlemek için ise 1 mHz lik alıcı-verici uygulanmıştır. Verici probtan üretilen elektriksel sinyal mekanik titreşime dönüştürülerek numuneye gönderilmekte, numune içinden geçen sinyal karşı taraftaki alıcı tarafından kaydedilmektedir. Hız ölçümü yapılırken, alıcı ve verici başlıklar ile numune arasına bir jel sürülmesi ve numune ile alıcı-verici başlıklara belli bir kuvvet uygulanarak

başlıkların numuneye iyi temas ettirilmesi çok önemlidir. Sinyalin numune içindeki yayılım süresinden hız belirlenmektedir. Bulunan bu ses üstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki elde edilmektedir. Ultrasonik dalga hızı deneyi her karışım için 6 adet 100 mm ölçülerindeki küp numuneler üzerinde uygulanmıştır. Beton numunenin bir yüzeyinden gönderilen ses üstü dalganın diğer yüzeyine ne kadar zamanda geçtiği Şekil 3.44 deki gibi ölçüldükten sonra, dalga hızı Eşitlik 3.8 e göre hesaplanmıştır [104].

$$V_p = \frac{S}{T} 10^6 \quad (3.8)$$

Burada;

V_p = Ultrasonik dalga hızı, (m/sn)

S = Numunenin ultrasonik dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe, (m)

T = Ultrasonik dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı diğer yüzeye kadar geçen zaman, (mikro saniye)



Şekil 3.44 : Ultrasonik dalga hızı ölçüm cihazı.

3.2.4 Termik özelliklerin belirlenmesi

3.2.4.1 Isıl iletkenlik deneyi

Yoğunluk ve sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik katsayıları, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Araştırma ve Uygulama Merkezinde, EN 12664, EN 12667 ve ISO 8301’de belirtilen şartlara uygun olarak ölçüm yapan Lasercomp marka HFM Fox-314, model heat flow meter (ısı akış ölçer) ile belirlenmiştir. HFM cihazı ile ölçüm yapılırken, numune farklı sıcaklıklara sahip iki plaka arasına yerleştirilmektedir. Bu plakalar peltier etki ile sabit bir sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Bu esnada cihaz alt ve üst plakalarında bulunan ısı akış ölçer ile ısı akışı ve ısıl çiftler ile numune sıcaklıkları ölçülmektedir. HFM ısıl dengeye ulaştığında ve numune üzerinde üniform sıcaklık gradyanı oluştuğunda ısıl iletkenlik katsayısı belirlenmiş olmaktadır. Şekil 3.45 te verilen HFM cihazı ile ısıl iletkenlik katsayısı, Eşitlik 3.9 de verilen Fourier ısı iletim denklemi kullanılarak belirlenmiştir [30,105-107].

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.9)$$

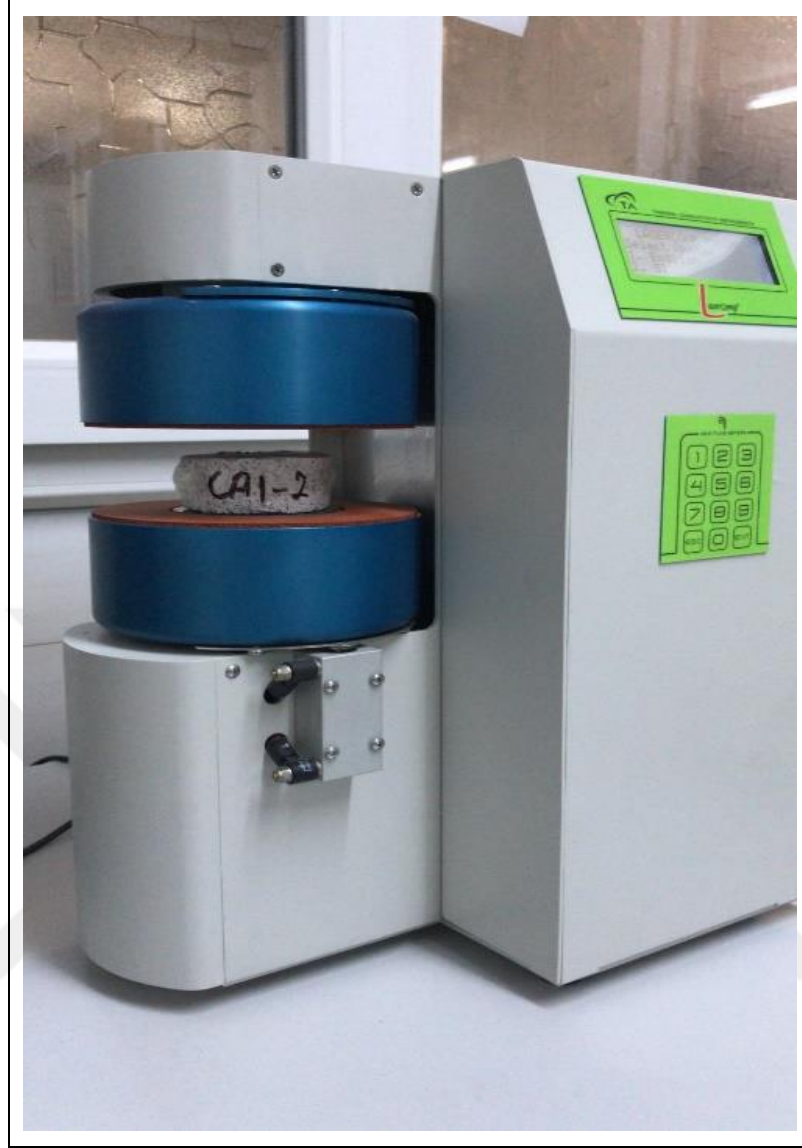
q= Isı akışı, (W/m²)

k=Isıl iletkenlik katsayısı, (W/mK)

A=Alan, (m²)

ΔT_1 =Sıcaklık farkı, (K)

Δx =Numune kalınlığı, (m)



Şekil 3.45 : Isıl iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı.

3.2.5 İstatistiksel yöntemler

3.2.5.1 Korelasyon analizi

Korelasyon belli bir tekniğe dayalı ve farklı alanlarda matematiksel açıdan önemli bir terimdir. Bu terim gündelik yaşam içerisinde farklı konular üzerinde işlem yapmak için sıkça kullanılmaktadır. Korelasyon, olasılık kuramı ve istatistikte iki rassal değişken arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve gücünü belirtmektedir. Verilerin değerlendirilmesinde istatistik hazır paket programlarından SPSS23 den yararlanılmıştır.

3.2.5.2 Yapay sinir ağları analizi

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin bilgi işleme tekniğinden esinlenerek geliştirilmiş bir bilgi işlem teknolojisidir. YSA ile basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şekli taklit edilmektedir. YSA insan zekâsının yeteneklerinden öğrenmeyi modelleyerek öğrenme yeteneği ile tahmin edebilme, yeni bilgi çıkartımı yapabilme gibi becerileri makinelere kazandırmayı amaçlayan yapay zeka yöntemidir. Matematik problemlerini çözmeye yarayan yetenekleri, herhangi bir yardım olmadan otomatik olarak gerçekleştirebilmek amacı ile geliştirilen bilgisayar sistemleridir. Verilerin değerlendirilmesinde istatistik hazır paket programlarından MATLAB R2015a programından yararlanılmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde cam atığı, mermer atığı, seramik atığı ve granit atığı ile üretilen gaz beton numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları sunulmuştur.

Çalışmada kullanılan atıklar, oranları ve kodları Çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan atıklar ve kodları.

Atık Oranı (%)	Atıklar			
	Cam	Mermer	Seramik	Granit
10	CA1	MA1	SA1	GA1
20	CA2	MA2	SA2	GA2
30	CA3	MA3	SA3	GA3
40	CA4	MA4	SA4	GA4
50	CA5	MA5	SA5	GA5

4.1 Kimyasal-Mineralojik Bulgular

4.1.1 Elementel analiz (XRF) sonuçları

Kontrol numunesinin (A), XRF analizi sonuçları Çizelge 4.2 de verilmiştir.

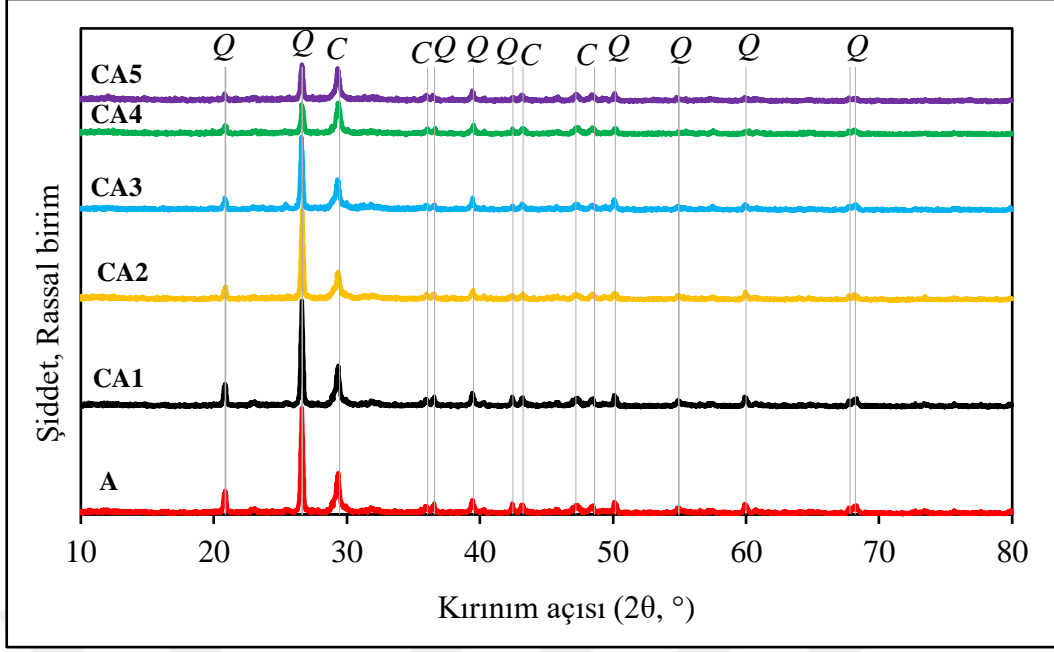
Çizelge 4.2 : Kontrol gaz beton numunesinin (A) kimyasal bileşimi.

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	K.K
	36,4	2,97	1,31	35,64	1,04	4,07	0,84	0,19	17,44

Çizelge 4.2 incelendiğinde kontrol numunesinin (A), ana bileşen olarak %36,4 oranında SiO₂ içerdiği, bu değeri %35,64 ile CaO'in izlediği, kızdırma kaybı değerinin ise %17,44 olduğu görülmektedir.

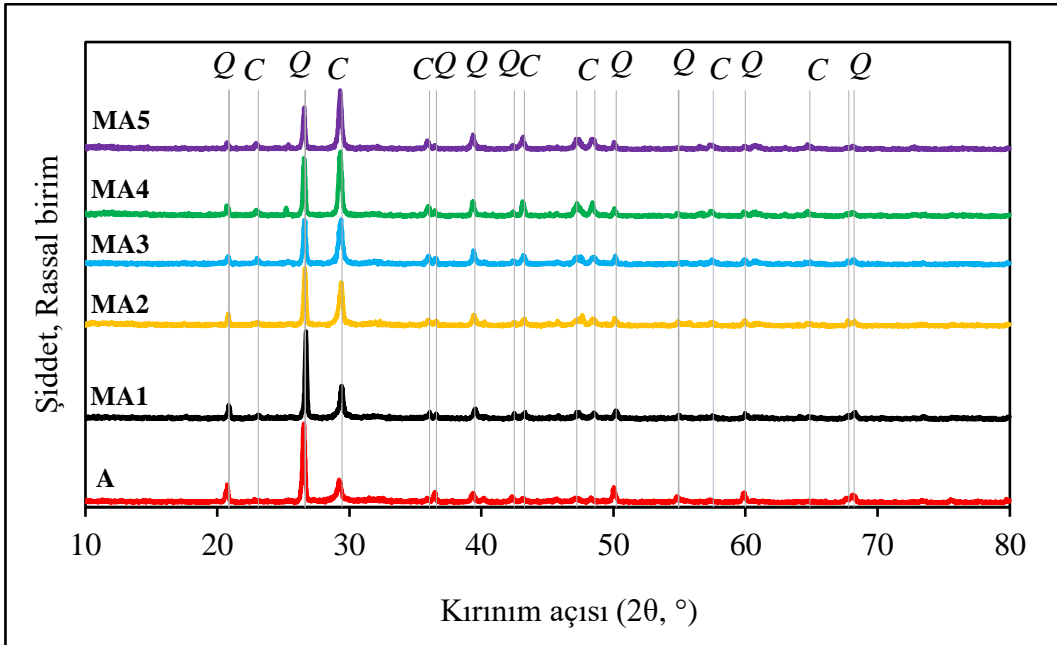
4.1.2 X-ışını kırınımı analizleri (XRD) sonuçları

Hazırlanan gaz beton örneklerinin İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi İBTAM'da yaptırılan XRD analizi sonuçlarında elde edilen X-ışını kırınım desenleri Şekil 4.1-4.4 de verilmiştir.



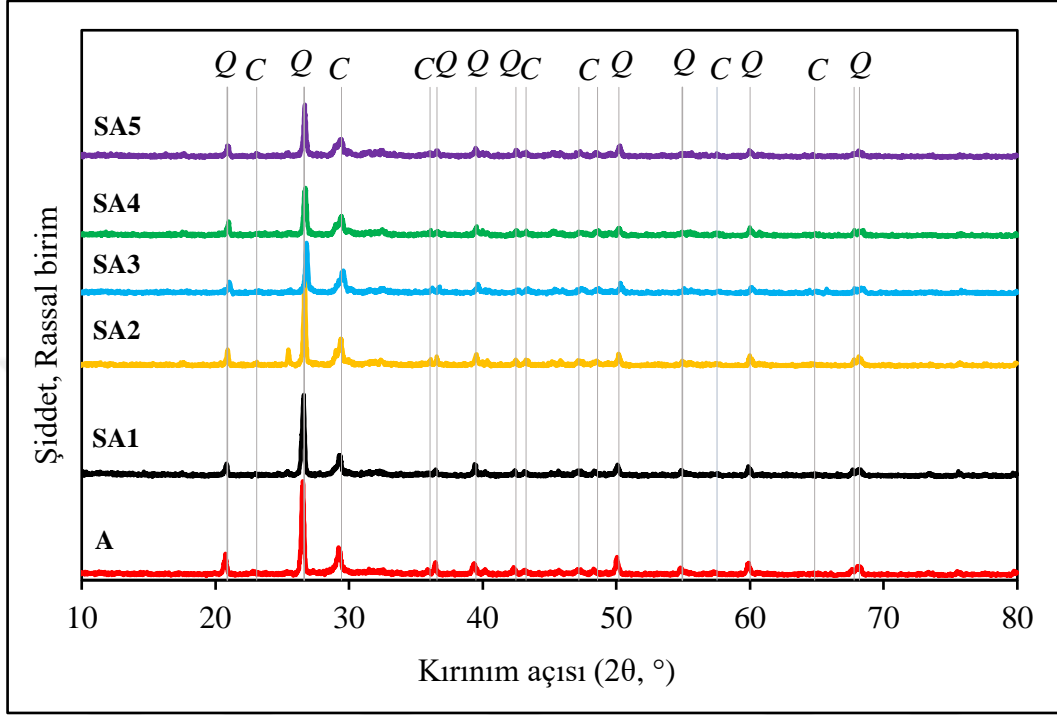
Şekil 4.1 : Cam atık katkılı gaz beton numunelerine ait X-ışınları difraktogramları (*Q: Kuvars, C: Kalsit*).

Şekil 4.1 de yer alan cam atık katkılı gaz beton numunelerine ait X-ışınları difraktogramları incelendiğinde örneklerin bünyesinde kuvars ve kalsit minerallerinin bulunduğu, gaz beton bünyesine giren cam atığının miktarı arttıkça kuvars piklerinin şiddetinin azaldığı, kalsit piklerinin arttığı görülmektedir. Kalsit piklerinin artmasının nedeninin bünyeye giren silis miktarının azalması ile kalsit miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



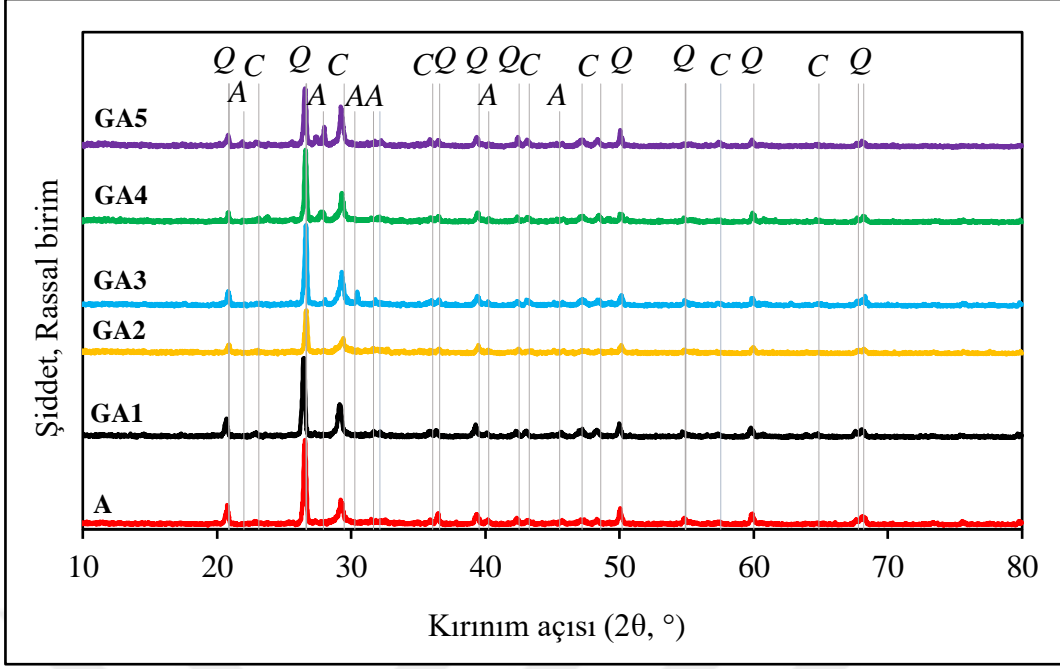
Şekil 4.2 : Mermer atık katkılı gaz beton numunelerine ait X-ışınları difraktogramları (*Q: Kuvars, C: Kalsit*).

Yapılan XRD analizinde (Şekil 4.2) mermer atık katkıli gaz beton numunelerin kuvars ve kalsit minerallerinden oluştuğu saptanmıştır. Gaz beton bünyesine giren mermer atığı oranı arttıkça kalsit piklerinin şiddeti artmaktadır. Mermer içerisinde bulunan kalsit oranının bünyede artması ile pik şiddetinin arttığı düşünülmektedir.



Şekil 4.3 : Seramik atık katkıli gaz beton numunelerine ait X-ışınları difraktogramları (Q:Kuvars, C:Kalsit).

Yapılan XRD analizlerinde (Şekil 4.3) seramik atık katkıli gaz beton numunelerin kuvars ve kalsit minerallerinden oluştuğu saptanmıştır. Kuvars piklerinin şiddetinin atığın artması ile birlikte azaldığı görülmektedir.

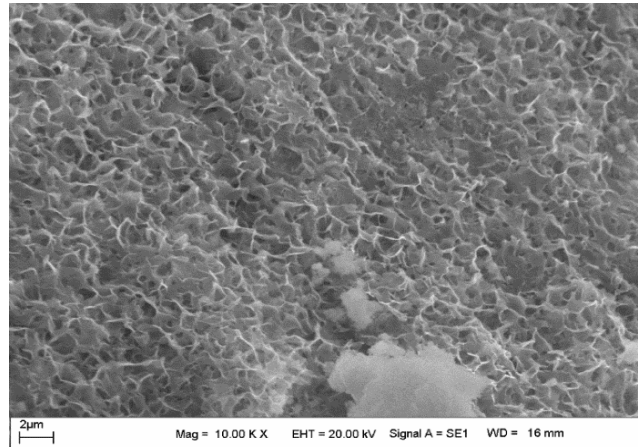


Şekil 4.4 : Granit atık katkılı gaz beton numunelerin ait X-ışınları difraktogramları (Q:Kuars, C:Kalsit, A:Anortit).

Yapılan XRD analizinde (Şekil 4.4) granit atık katkılı gaz beton numunelerin kuvars, kalsit ve anortit minerallerinden oluştuğu saptanmıştır. %20 katkılı GA2 örneğinde kuvars ve kalsit piklerinin şiddetinin azaldığı, diğer örneklerde önemli bir değişikliğin olmadığı saptanmıştır.

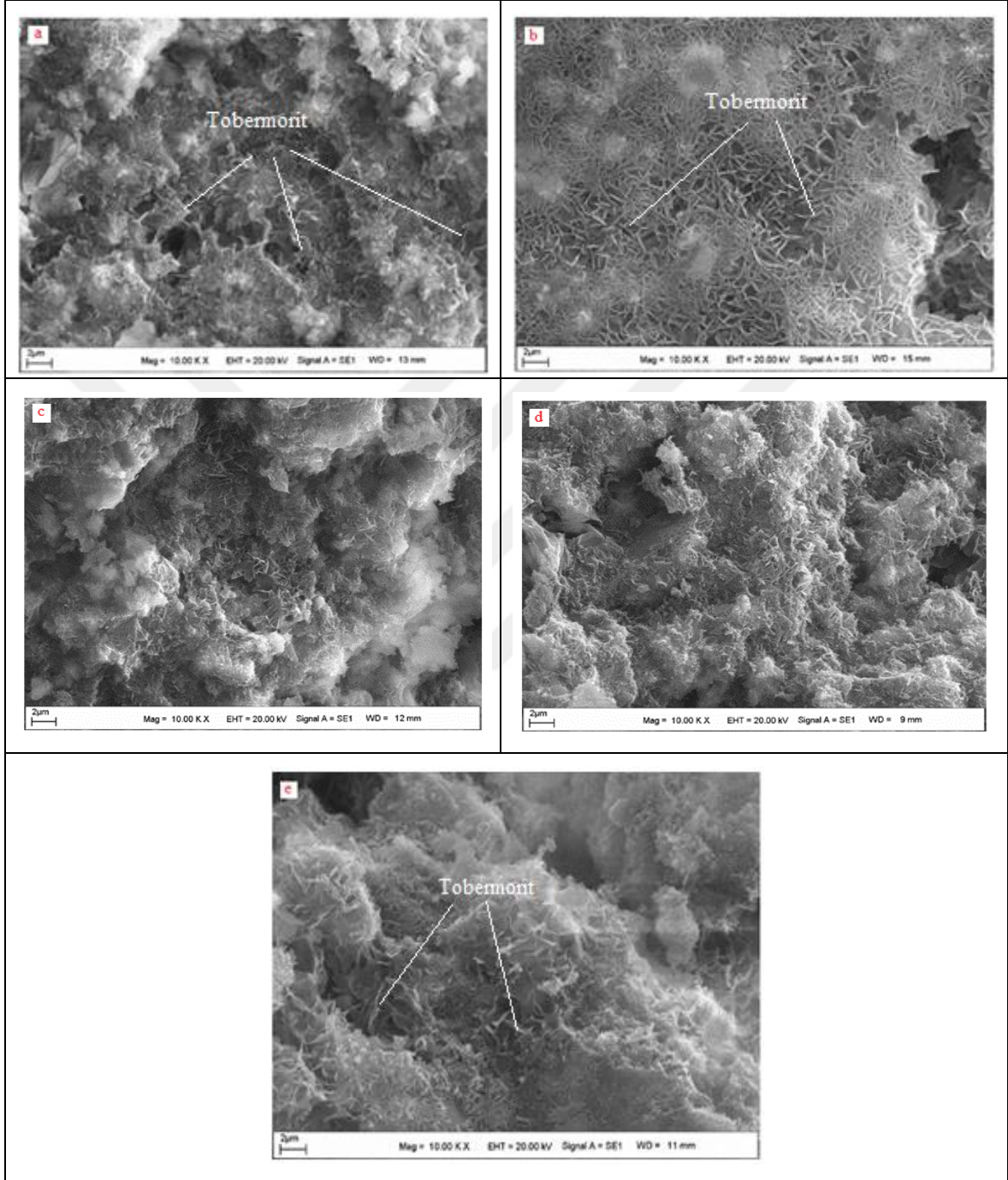
4.1.3 Taramalı elektron mikroskobu analiz (SEM) sonuçları

İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi İBTAM’da taramalı elektron mikroskobunda 10.00 KX büyütme oranı ile gerçekleştirilen SEM görüntüleri Şekil 4.5-4.9 da verilmiştir.



Şekil 4.5 : Kontrol gaz beton numunesinin (A) SEM görüntüsü.

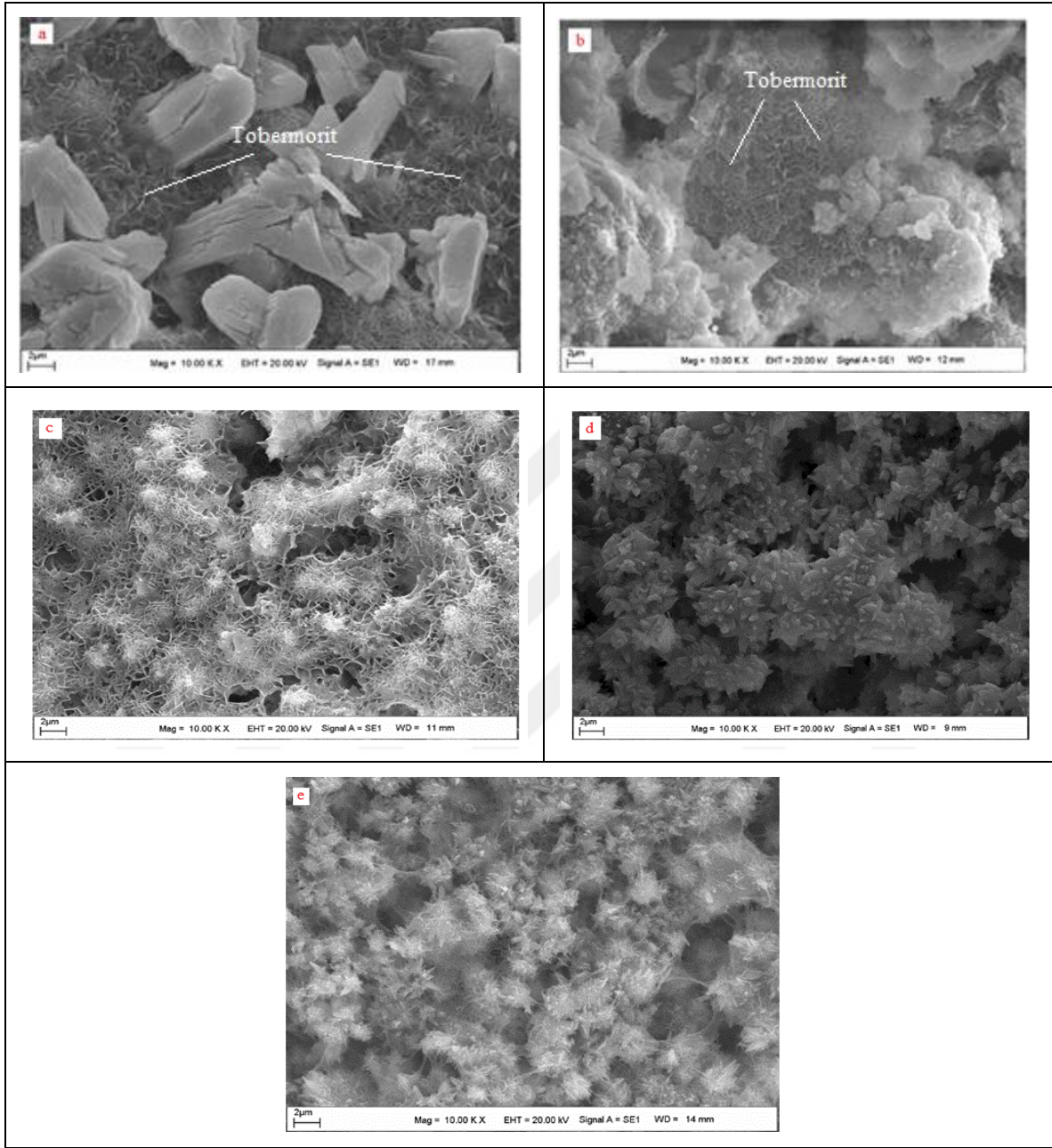
Kontrol gaz beton örneğinin (A), SEM görüntüleri incelendiğinde yapı içerisinde CSH jellerinin olduğu, baskın olarak iyi gelişmiş kristal hidratasyon fazı olan tobermorit plakalarının var olduğu ve tobermorit plakalarının düzenli tekrarlandığı gözlenmiştir.



Şekil 4.6 : Cam atıklı gaz betonların SEM görüntüsü.
(a:CA1,b:CA2,c:CA3,d:CA4,e:CA5)

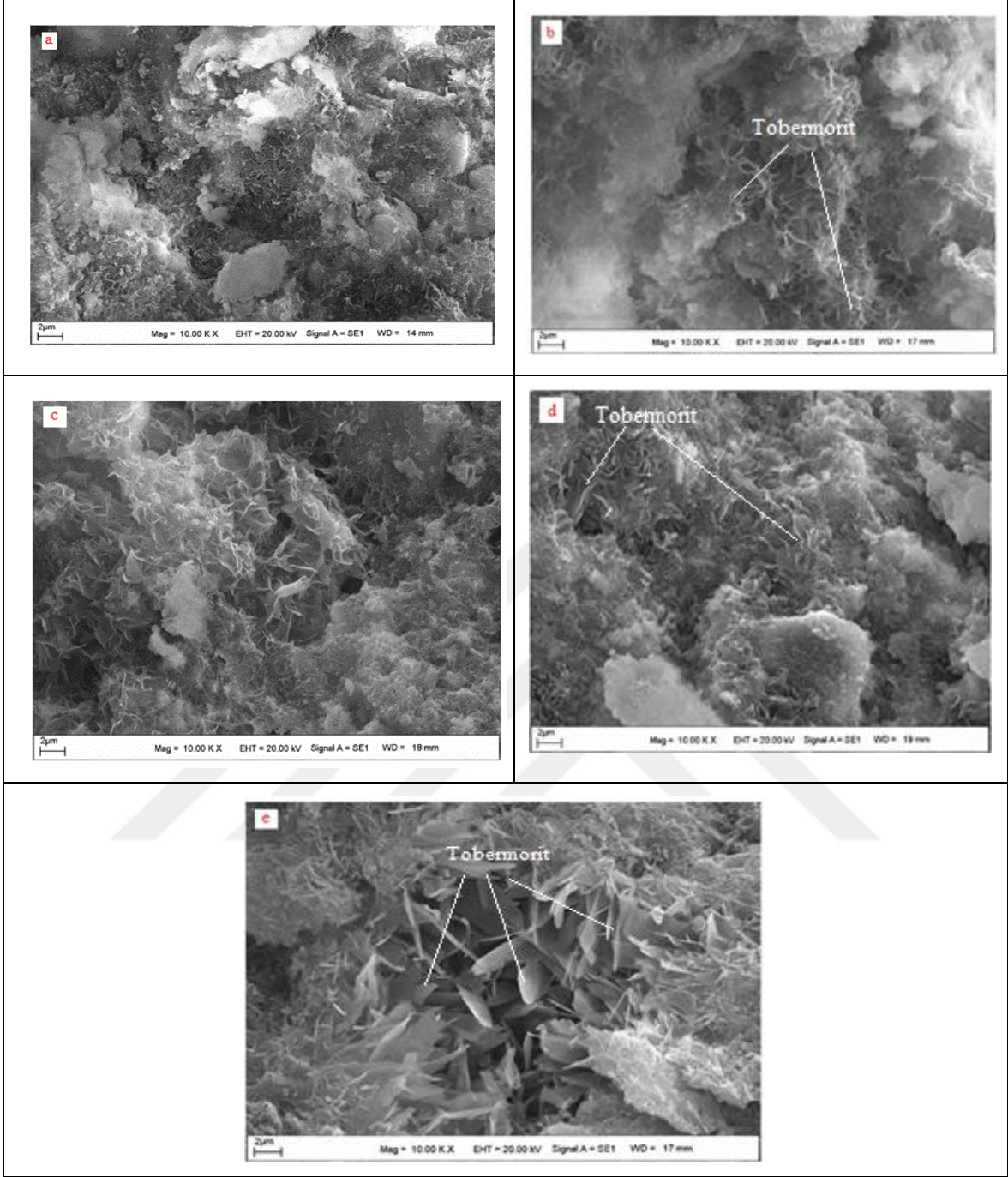
Cam atığı katkılı örneklerin SEM görüntüleri (Şekil 4.6) incelendiğinde ise CSH jellerinin yoğun ve büyük boyutlu olduğu, etringit oluşumlarının olmadığı, tobermorit plakalarının düzenli tekrarlandığı gözlemlenmiştir. Yapı içerisinde baskın olarak iyi gelişmiş kristal

hidratasyon fazı olan tobermorit plakalarının varlığı gözlenmiştir. Ayrıca boşluklar kararsız bir yapıda ve birbirlerinden bağımsız şekilde oluşmuştur.



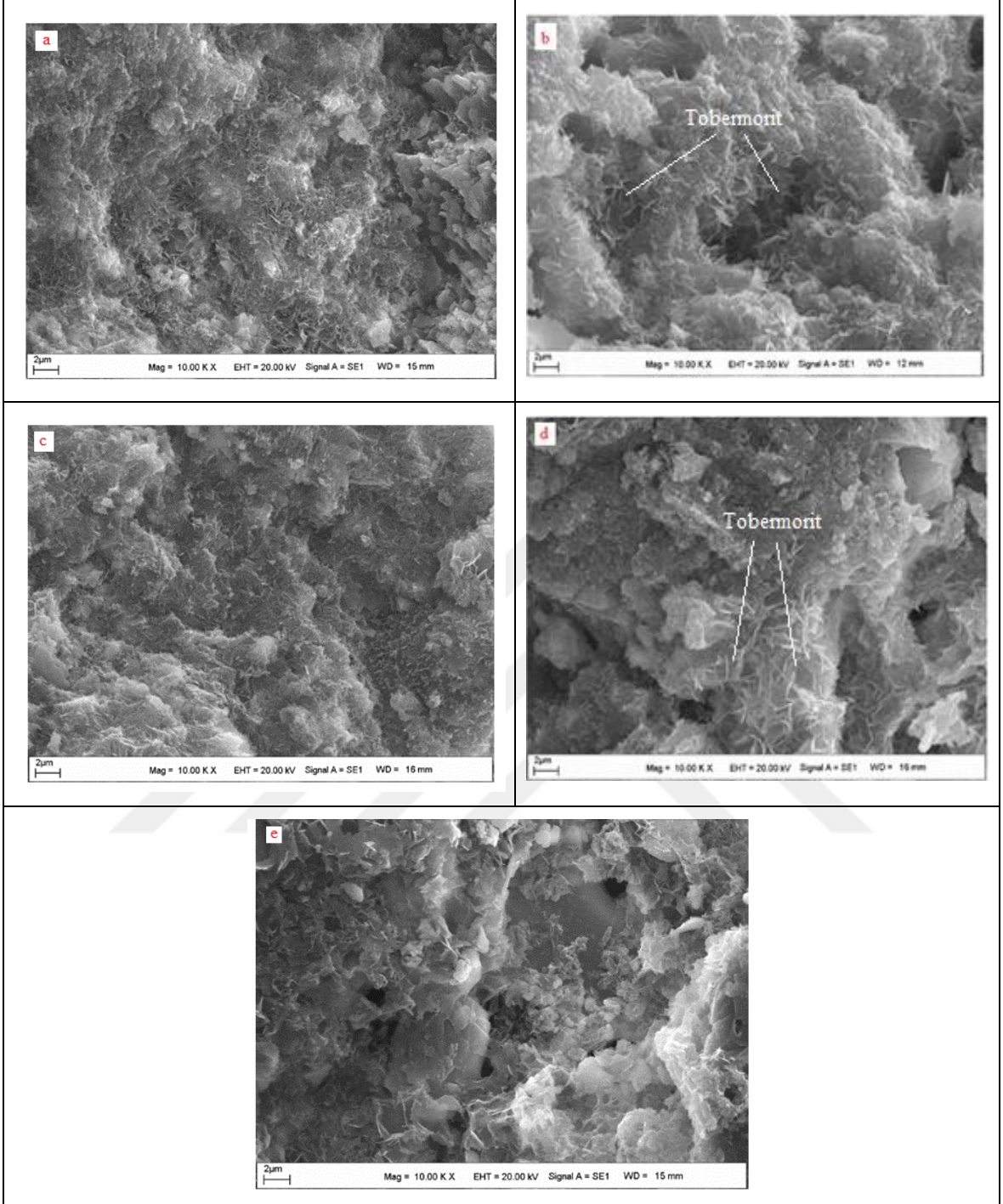
Şekil 4.7 : Mermer atıklı gaz betonların SEM görüntüsü.
(a:MA1,b:MA2,c:MA3,d:MA4,e:MA5)

Mermer atığı katkılı örneklerin SEM görüntüleri (Şekil 4.7) incelendiğinde ise CSH jellerinin homojen geliştiği, taneli yapının olduğu, etringit oluşumlarının yer almadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8 : Seramik atıklı gaz betonların SEM görüntüsü.(a:SA1,b:SA2,c:SA3,d:SA4,e:SA5)

Seramik atığı katkılı örneklerin SEM görüntülerinde (Şekil 4.8) ise CSH jellerinin büyük boyutlu ve yoğun olduğu, etringit oluşumlarının bulunmadığı, tobermorit plakalarının düzenli tekrarlandığı görülmektedir.



Şekil 4.9 : Granit atıklı gaz betonların SEM görüntüsü.
(a:GA1,b:GA2,c:GA3,d:GA4,e:GA5)

Granit atığı katkılı örneklerin SEM görüntüleri (Şekil 4.9) incelendiğinde ise CSH jellerinin yoğun ve homojen dağıldığı, jellerin boyutlarının büyük olduğu, etringit oluşumlarının olmadığı, tobermorit plakalarının düzenli tekrarlandığı gözlemlenmiştir.

Atık katkılı gaz beton serilerinde CSH ve tobermorit oluşumları en fazla cam ve seramik atık katkılı örneklerde, en az mermer atık katkılı örneklerde gelişmiştir. Bu durumun mermer atık

katkılı örneklerde silis ile kirecin yeterli oranda reaksiyona girmemesinden kaynaklandığı düşünülmüştür.

4.2 Fiziksel-Mekanik Bulgular

4.2.1 Birim hacim ağırlık deney sonuçları

TS EN 772-13 ve TS EN 771-4:2011+A1 e göre yapılan birim hacim ağırlığı deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3-4.6 da, numunelerin atık-malzeme karışım oranları ile birim hacim ağırlığı ilişkisi Şekil 4.10 da verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Cam atıklı örneklerin birim hacim ağırlığı değerleri.

Örnek No	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)					
	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
1	542,28	568,58	526,91	537,43	513,46	531,65
2	566,23	560,38	541,18	561,11	540,94	537,33
3	561,78	579,26	522,90	524,08	541,88	537,14
4	533,06	572,08	535,26	532,81	546,26	532,56
5	526,32	564,27	526,78	533,05	532,25	533,26
6	504,20	580,05	513,42	523,25	524,53	533,50
Ort	538,98±23,14	570,77±7,94	527,74±9,67	535,29±13,81	533,22±12,42	534,24±2,41
Değişim (%)		5,89	-2,085	-0,685	-1,068	-0,879

Çizelge 4.3 incelendiğinde cam atık kullanılarak üretilen gaz betonların, birim hacim ağırlığı değerlerinin 527,74 kg/m³ ile 570,77 kg/m³ aralığında olduğu, atık oranı %10 dan %20 ye çıktığında değerlerin düşüş gösterdiği görülmektedir. Kontrol numunesine (A) göre yapılan kıyaslamada sadece %10 atık oranında elde edilen birim hacim ağırlığı değerinin %5,89 oranında artış gösterdiği, atık oranı arttıkça birim hacim ağırlığı değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bu düşüş en fazla %20 atık oranı kullanılan CA2 serisinde gözlenmiştir.

Çizelge 4.4 : Mermer atıklı örneklerin birim hacim ağırlığı değerleri.

Örnek No	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)					
	A	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
1	542,28	559,23	575,92	594,86	575,24	570,51
2	566,23	555,89	564,70	602,89	588,01	559,76
3	561,78	532,47	566,26	604,02	570,08	574,56
4	533,06	561,58	583,87	536,85	578,99	563,57
5	526,32	570,67	570,73	533,05	-	576,65
6	504,20	545,39	551,67	549,14	-	588,59
Ort.	538,98±23,14	554,2±13,44	568,86±10,94	570,13±33,93	578,08±7,56	572,28±10,26
Değişim (%)		2,824	5,543	5,780	7,254	6,177

Çizelge 4.4 incelendiğinde mermer atığı kullanılarak üretilen serilerde birim hacim ağırlığı değerlerinin 554,2 kg/m³ ile 578,08 kg/m³ arasında değişim gösterdiği, atık oranı arttıkça değerlerin arttığı ve en yüksek değer %40 atık oranına sahip MA4 serisinde elde edildiği görülmektedir. Kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamada tüm atık oranlarında elde edilen değerlerin kontrol numunesinin (A), birim hacim ağırlığı değerlerine göre artış gösterdiği, bu eğilimin en fazla MA4 serisinde %7,254 oranı ile gerçekleştirdiği görülmektedir.

Çizelge 4.5 : Seramik atıklı örneklerin birim hacim ağırlığı değerleri.

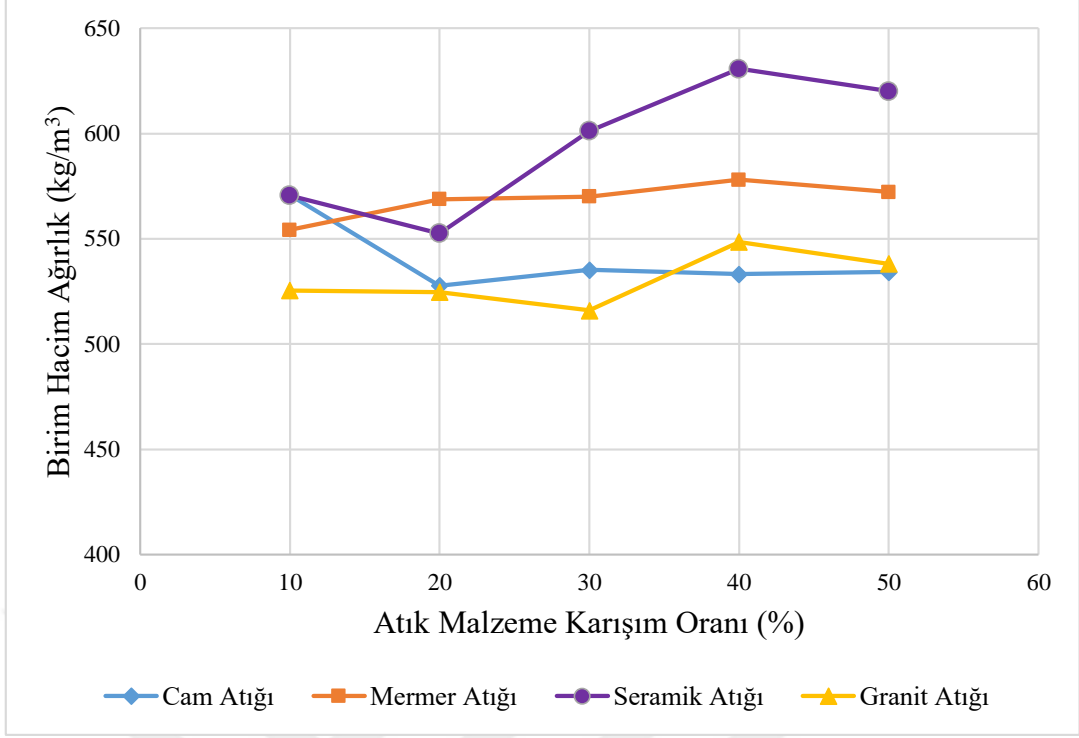
Örnek No	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)					
	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
1	542,28	553,64	550,08	600,08	626,18	645,900
2	566,23	569,17	572,99	630,86	655,90	668,76
3	561,78	565,84	569,97	579,95	627,09	643,21
4	533,06	572,71	549,35	592,16	617,58	591,86
5	526,32	587,64	529,46	618,11	637,21	598,08
6	504,20	574,53	543,62	586,77	620,72	573,03
Ort.	538,98±23,14	570,59±11,16	552,58±16,43	601,3±19,54	630,78±14,02	620,14±37,59
Değişim (%)		5,864	2,522	11,566	17,031	15,05

Çizelge 4.5 incelendiğinde seramik atığı kullanılarak üretilen örneklerde birim hacim ağırlığı değerlerinin 552,58 kg/m³ ile 630,78 kg/m³ değerleri arasında değiştiği, seramik atığı katkısının oranı arttıkça birim hacim ağırlığı değerlerinin de arttığı görülmektedir. Kontrol numunesinin (A) birim hacim ağırlığı değerlerine göre kıyaslama yapıldığında atık katkısının tüm serilerde birim hacim ağırlığını artırıcı yönde etki yaptığını görmek mümkündür. Bu artış, atık oranı artışı ile dalgalı bir seyir izlemiş ve en fazla %17,031 değeri ile SA4 serisinde gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.6 : Granit atıklı örneklerin birim hacim ağırlığı değerleri.

Örnek No	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)					
	A	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5
1	542,28	520,88	540,24	509,68	551,15	534,63
2	566,23	536,50	524,88	503,16	552,63	555,67
3	561,78	544,09	500,38	512,53	561,29	548,94
4	533,06	529,75	524,08	538,57	534,57	519,12
5	526,32	527,08	529,36	-	539,80	537,31
6	504,20	494,84	529,75	-	552,20	533,14
Ort.	538,98±23,14	525,53±17,02	524,78±13,27	515,98±15,56	548,61±9,71	538,13±12,84
Değişim (%)		-2,49	-2,63	-4,26	1,78	-0,15

Çizelge 4.6 incelendiğinde ise granit atığı kullanılarak üretilen örneklerde birim hacim ağırlığı değerlerinin en düşük 515,98 kg/m³ değeri ile GA3 serisinde, en yüksek 548,61 kg/m³ değeri ile GA4 serisinde elde edildiği görülmektedir. Kontrol numunesine (A) göre yapılan kıyaslamada GA4 serisi hariç tüm serilerde granit atığının, birim hacim ağırlığını azaltıcı yönde etki yaptığı görülmektedir. Granit atığının kullanımının, birim hacim ağırlığını azaltıcı yöndeki etkisi, en fazla SA3 serisinde %4,26 oranı ile gerçekleşmiştir.



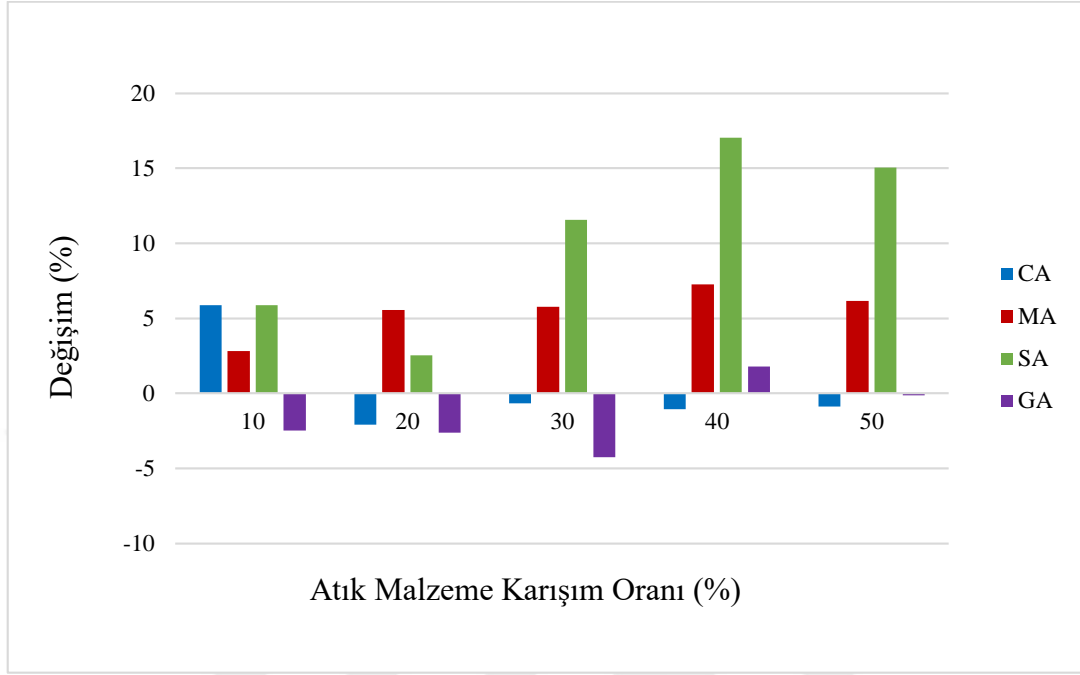
Şekil 4.10 : Birim hacim ağırlık-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.

Şekil 4.10 da görüldüğü gibi atık katkıli karışımların birim hacim ağırlık değerleri değişkenlik göstermektedir. Gaz beton numunelerinin birim hacim ağırlıkları $515,984 \text{ kg/m}^3$ ile $630,779 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. En düşük birim hacim ağırlığının %30 katkıli GA3 serisine, en yüksek birim hacim ağırlığının %40 katkıli SA4 serisine ait olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3-4.6 ve Şekil 4.10 incelendiğinde cam, mermer, seramik, granit atıklarının değişik oranlarda kullanılmasıyla üretilen gaz beton numunelerin, birim hacim ağırlık değerleri kıyaslandığında seramik atık kullanılan serilerde daha yüksek birim hacim ağırlık değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu seriyi cam atıkları, daha sonrada mermer atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serileri takip etmektedir. En düşük birim hacim ağırlık değeri granit atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serilerinde elde edilmiştir.

En yüksek birim hacim ağırlık değerlerinin elde edildiği seramik atık kullanılarak üretilen gaz betonların bünyelerinde, atık oranı arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinin %20 atık oranı değerinde azaldığı, diğer oranlarda arttığı Şekil 4.10 ve Çizelge 4.3-4.6 dan anlaşılmaktadır.

Gaz beton bünyesine eklenen atıkların birim hacim ağırlığı üzerindeki etkisinin belirlenmesi için kontrol numunesine (A) göre, hesaplanan % değişimlerin grafiksel gösterimlerini Şekil 4.11 de verilmiştir.



Şekil 4.11 : Birim hacim ağırlığın atık miktarına göre yüzdesel değişimi.

Şekil 4.11 de %30 oranında granit atığının kullanıldığı serinin birim hacim ağırlık değeri, kontrol numunesinin (A) birim hacim ağırlık değerine göre %4,26 azalmıştır. En yüksek birim hacim ağırlık değerinin elde edildiği SA4 serisinde birim hacim ağırlık değeri kontrol numunesinin (A) birim hacim ağırlık değerine göre %17,03 artış göstermiştir. Şekil 4.11 değerlendirildiğinde cam ve granit atıklarının genelde birim hacim ağırlığını azaltıcı, mermer ve seramik atıklarının ise artırıcı yönde etki yaptığı görülmektedir. Bu durumun seramik ve mermer atıklarının özgül ağırlıklarının cam ve granit atıklarına göre daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 2.4 ile birim hacim ağırlık değerleri benzerlik göstermekte, birim hacim ağırlık değerleri, su/katı oranı ve Al tozu miktarı artırılarak düşürülebilmektedir.

4.2.2 Porozite deney sonuçları

TS EN 772-4 e göre yapılan porozite deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7-4.10 da verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Cam atıklı örneklerin porozite değerleri.

Örnek No	Porozite (%)					
	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
1	41,81	37,79	38,45	32,84	41,13	40,93
2	54,67	38,65	40,36	43,22	39,61	40,58
Ort.	48,24±9,09	38,22±0,61	39,41±1,35	38,03±7,34	40,37±1,07	40,76±0,25
Değişim (%)		-20,77	-18,31	-21,16	-16,32	-15,50

Çizelge 4.7 incelendiğinde cam atık katkılı gaz betonların porozite değerlerinin %38,03 CA3 ile %40,76 CA5 arasında değiştiği görülmektedir. Örneklerde cam atık oranı arttıkça porozite değeri artış göstermiştir. Ancak kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamalarda cam atık katkısının, poroziteyi azaltıcı yönde etki yaptığı görülmektedir.

Çizelge 4.8 : Mermer atıklı örneklerin porozite değerleri.

Örnek No	Porozite (%)					
	A	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
1	41,81	41,72	45,14	44,58	41,10	40,79
2	54,67	41,27	43,99	41,83	40,13	41,15
Ort.	48,24±9,09	41,49±0,32	44,57±0,81	43,2±1,94	40,61±0,69	40,96±0,25
Değişim (%)		-13,98	-7,61	-10,44	-15,81	-15,08

Çizelge 4.8 e göre mermer atık katkılı gaz beton örneklerinin porozite değerleri en yüksek %20 atık oranına sahip MA2 serisinde %44,57, en düşükde %40 atık oranına sahip MA4 serisinde %40,61 olarak elde edilmiştir. Kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamalarda mermer atığı katkısının tüm serilerde poroziteyi azaltıcı yönde etki yaptığı görülmektedir. Bu etkinin %40 ve %50 katkı oranlarında daha fazla olması dikkat çekicidir.

Çizelge 4.9 : Seramik atıklı örneklerin porozite değerleri.

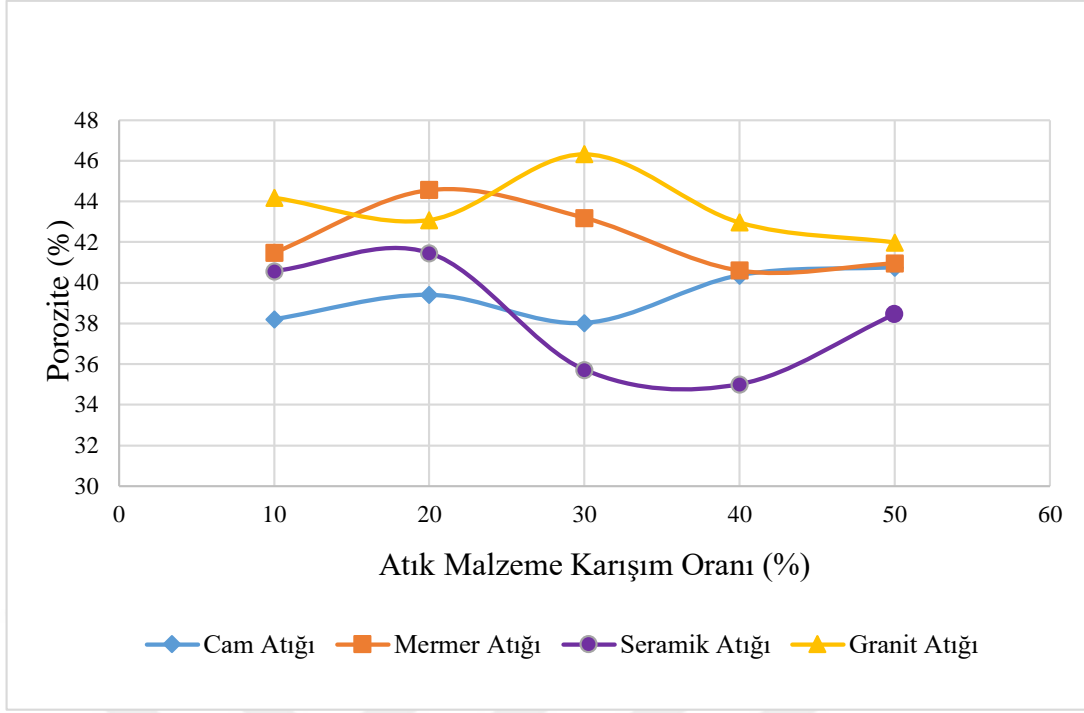
Örnek No	Porozite (%)					
	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
1	41,81	39,94	40,74	35,60	35,60	38,69
2	54,67	41,20	42,18	35,85	34,43	38,22
Ort.	48,24±9,09	40,57±0,9	41,46±1,02	35,72±0,18	35,01±0,83	38,45±0,33
Değişim (%)		-15,89	-14,05	-25,94	-27,41	-20,29

Çizelge 4.9 da verilen seramik atık katkılı gaz beton örneklerinin porozite değerleri incelendiğinde en yüksek %20 atık katkılı SA2 serisinde %41,46, en düşük de %40 atık katkılı SA4 serisinde %35,01 değerinin elde edildiği görülmektedir. Seramik atık katkılı örneklerin porozite değerlerini de kontrol numunesi (A) ile kıyasladığımızda tüm örneklerin porozite değerlerinin azalma eğiliminde olduğunu ve bu eğilimin atık oranı artışına göre dalgalı bir seyir izlediği görülmektedir.

Çizelge 4.10 : Granit atıklı örneklerin porozite değerleri.

Örnek No	Porozite (%)					
	A	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5
1	41,81	44,57	42,59	44,89	41,35	42,8
2	54,67	43,82	43,60	47,77	44,59	41,20
Ort.	48,24±9,09	44,19±0,53	43,1±0,71	46,33±2,04	42,97±0,29	42±1,13
Değişim (%)		-8,39	-10,66	-3,96	-10,92	-12,94

Granit atıkları kullanılarak üretilen gaz beton örneklerinin porozite değerlerinin yer aldığı Çizelge 4.10 incelendiğinde en yüksek porozite değerinin %30 atık kullanılarak üretilen GA3 serisinde, en düşük porozite değerinin ise %50 atık kullanılarak üretilen gaz beton serisinde elde edildiği görülmektedir. Diğer atık katkılı serilerde olduğu gibi granit atıklı serilerde de kontrol numunesinin (A) porozite değerine kıyasla düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş oranı %30 katkılı seride oldukça düşük oranda (%3,96) gelişmiştir. Porozite ile atık malzeme karışım oranı ilişkisi Şekil 4.12 de verilmiştir.



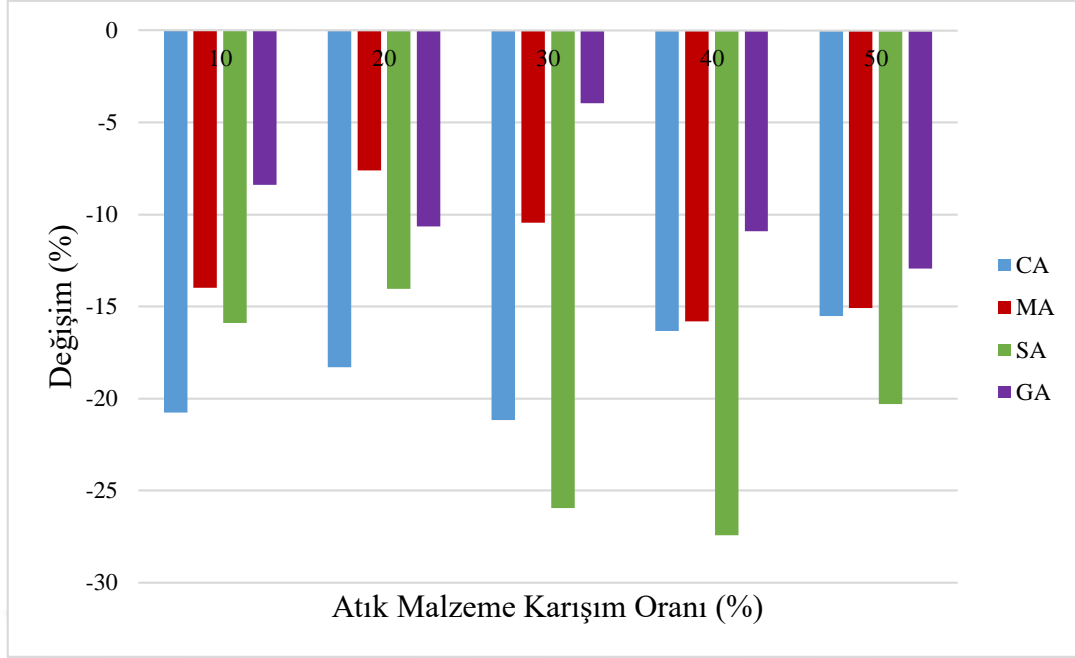
Şekil 4.12 : Porozite-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.

Şekil 4.12 de atık katkılı karışımların porozite değerleri birim hacim ağırlık değerlerinin azalmasıyla artmaktadır. Gaz beton numunelerin porozitesi 35,014 ile 46,327 arasında değişmektedir. En düşük porozite değerinin %40 katkılı SA4 seramik atığı, en yüksek porozite değerinin %30 katkılı GA3 granit atığı serisinde olduğu gözlemlenmiştir. En düşük porozite değerleri seramik atığının olduğu gaz beton örneklerinde görülmüştür.

Çizelge 4.7-4.10 ve Şekil 4.12 incelendiğinde cam, mermer, seramik, granit atıklarının değişik oranlarda kullanılmasıyla üretilen gaz beton numunelerin porozite değerleri kıyaslandığında granit atık kullanılan serilerde daha yüksek porozite değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu seriyi mermer atıkları, daha sonrada cam atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serileri takip etmektedir. En düşük porozite değeri seramik atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serilerinde elde edilmiştir.

En yüksek porozite değerlerinin elde edildiği granit atık kullanılarak üretilen gaz betonların bünyelerinde atık oranı arttıkça porozite değerlerinin %20 oranında azaldığı, %30 oranında arttığı, %40 ve %50 oranlarında ise tekrar azaldığı Şekil 4.12 ve Çizelge 4.7-4.10 dan anlaşılmaktadır. Bunun sonucu olarak birim hacim ağırlığı değerleri ile porozite değerlerinin uyumlu olduğu görülmektedir.

Kontrol numunesi (A) nın porozite değerlerine göre hesaplanan % değişimlerin grafiksel gösterimi Şekil 4.13 de verilmiştir.



Şekil 4.13 : Porozitenin atık miktarına göre yüzdesel değişimi.

Şekil 4.13 de tüm serilerin porozite değerlerinin kontrol numunesine (A) göre değişimlerinin grafiksel gösterimi verilmiştir. Tüm serilerde kullanılan atıklar poroziteyi azaltıcı yönde etki yapmışlardır. Bu etki en fazla seramik atıklı örneklerde gözlemlenmektedir. %40 oranında seramik atığının kullanıldığı serinin porozite değeri, kontrol numunesinin (A) porozite değerine göre %27,41 azalmıştır. Diğer serilerle kıyaslandığında daha yüksek porozite değerlerinin elde edildiği granit atıklı örnekler içinde GA3 serisinde porozite değeri, kontrol numunesinin (A) porozite değerine göre %3,96 azalma gözlenmiştir. Bu değer diğer numunelerdeki azalma miktarı içinde en düşük değerdir.

4.2.3 Su emme deney sonuçları

TS EN 771-4:2011+A1 e göre yapılan su emme deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11-4.14 de verilmiştir.

Çizelge 4.11 : Cam atıklı örneklerin su emme değerleri.

Örnek No	Su Emme (%)					
	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
1	77,10	66,46	72,97	62,67	80,10	76,18
2	82,81	67,55	75,41	82,60	73,22	76,07
Ort.	79,96±4,04	67,01±0,77	74,19±1,73	72,63±14,09	76,66±4,86	76,13±0,08
Değişim (%)		-16,19	-7,21	-9,16	-4,12	-4,79

Çizelge 4.11 de verilen cam atıklı gaz betonların su emme değerleri incelendiğinde en düşük %10 atık oranına sahip CA1 serisinde %67,01 değerinin, en yüksek %40 atık katkılı CA4 serisinde %76,66 değerinin elde edildiği görülmektedir. Su emme değerleri karşılaştırıldığında atık oranı artışı ile birlikte su emme miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. Kontrol numunesinin (A) su emme değeri ile yapılan kıyaslamada tüm cam atığı katkılı örneklerin su emme değerlerinin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Ancak bu azalma atık oranı artışı ile düşmüştür.

Çizelge 4.12 : Mermer atıklı örneklerin su emme değerleri.

Örnek No	Su Emme (%)					
	A	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
1	77,10	75,04	78,38	74,94	71,45	72,87
2	82,81	75,67	77,91	69,38	70,39	71,59
Ort.	79,96±4,04	75,36±0,45	78,14±0,33	72,16±3,93	70,92±0,75	72,23±0,91
Değişim (%)		-5,75	-2,27	-9,75	-11,30	-9,66

Mermer atıklı örneklerin su emme değerlerinin yer aldığı Çizelge 4.12 incelendiğinde en yüksek su emme değerinin %20 atık oranına sahip MA2 serisinde %78,14 değeri ile en düşük su emme değerinin ise %40 atık oranı ile üretilen MA4 serisinde %70,92 değeri ile elde edildiği görülmektedir. Bu seride de kontrol numunesinin (A) su emme değeri ile yapılan kıyaslamada düşüş olduğu görülmektedir. Bu düşüş atık oranı artışı ile orantılı bir ilişki içinde gelişmemiş, dalgalı bir seyir izlemiş, en fazla MA4 serisinde gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.13 : Seramik atıklı örneklerin su emme değerleri.

Örnek No	Su Emme (%)					
	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
1	77,1	72,14	71,11	56,43	57,65	65,36
2	82,81	70,12	76,78	58	54,02	63,9
Ort.	79,96±4,04	71,13±1,43	73,94±4,01	57,21±1,11	55,84±2,57	64,63±1,03
Değişim (%)		-11,04	-7,52	-28,44	-30,04	-19,16

Çizelge 4.13 de yer alan veriler incelendiğinde seramik atık katkılı örneklerin su emme değerlerinin en düşük %55,84 değeri ile %40 atık oranlı SA4 serisinde en büyük su emme değerinin ise %71,13 değeri ile SA1 serisinde elde edildiği görülmektedir. Genel olarak bakıldığında tüm serilerde su emme değeri kontrol numunesinin (A) su emme değerine göre azalma göstermiştir. Özellikle SA4 serisinde gerçekleşen azalma %30,04 oranı ile oldukça büyük değerdedir. Seramik atık oranının %30 ve %40 oranlarda bünyeye katılmasının su emme değerini oldukça önemli derecede azalttığı görülmektedir.

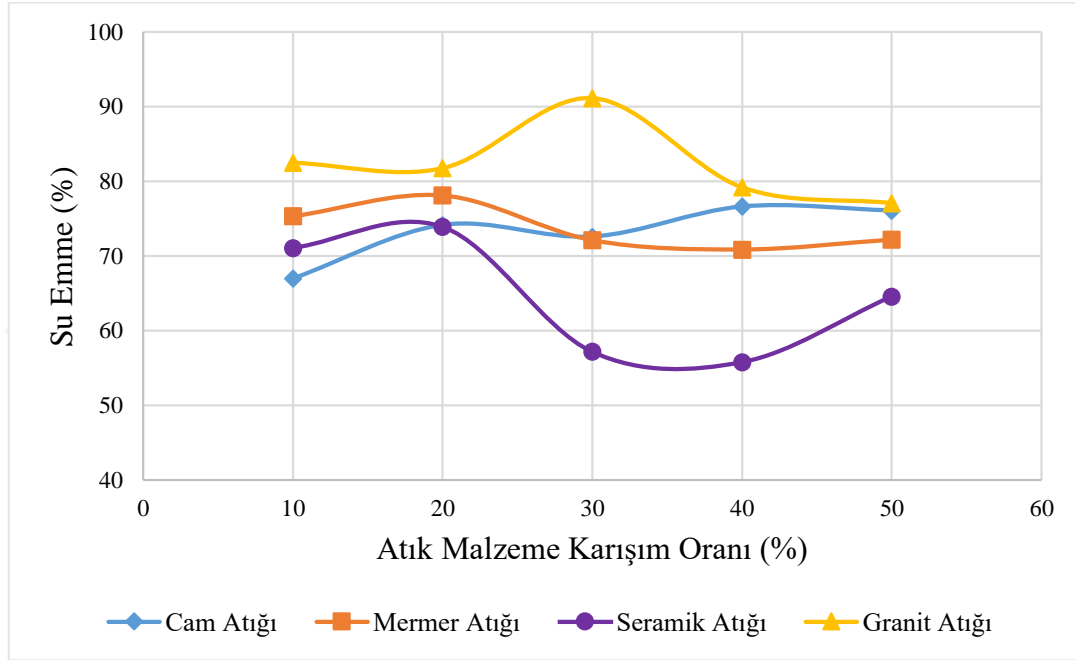
Çizelge 4.14 : Granit atıklı örneklerin su emme değerleri.

Örnek No	Su Emme (%)					
	A	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5
1	77,10	81,91	81,28	89,21	75,02	80,05
2	82,81	83,13	82,30	93,20	83,42	74,14
Ort.	79,96±4,04	82,52±0,86	81,79±0,72	91,21±2,82	79,22±5,94	77,09±4,18
Değişim (%)		3,20	2,28	14,05	-0,92	-3,58

Çizelge 4.14 de verilen su emme değerleri, granit atığı katkılı serilerde en yüksek %30 katkılı GA3 serisinde %91,21 değeri ile, en düşük %50 katkılı GA5 serisinde %77,09 değeri ile elde edilmiştir. Granit atık katkılı örneklerin su emme değerleri kontrol numunesinin (A) su emme değerleri ile kıyaslandığında diğer serilerden farklı olarak bir artışın sözkonusu olduğu görülmektedir. Bu artış atık oranı %10-30 arasında iken gerçekleşmiş ve %30

oranında en büyük değerini almış, %40-50 oranlarında azalma eğilimine girmiştir. Atık miktarı arttıkça azalma eğilimi devam etmiştir.

Su emme ile atık malzeme karışım oranı ilişkisinin grafiksel gösterimi Şekil 4.14 de verilmiştir.



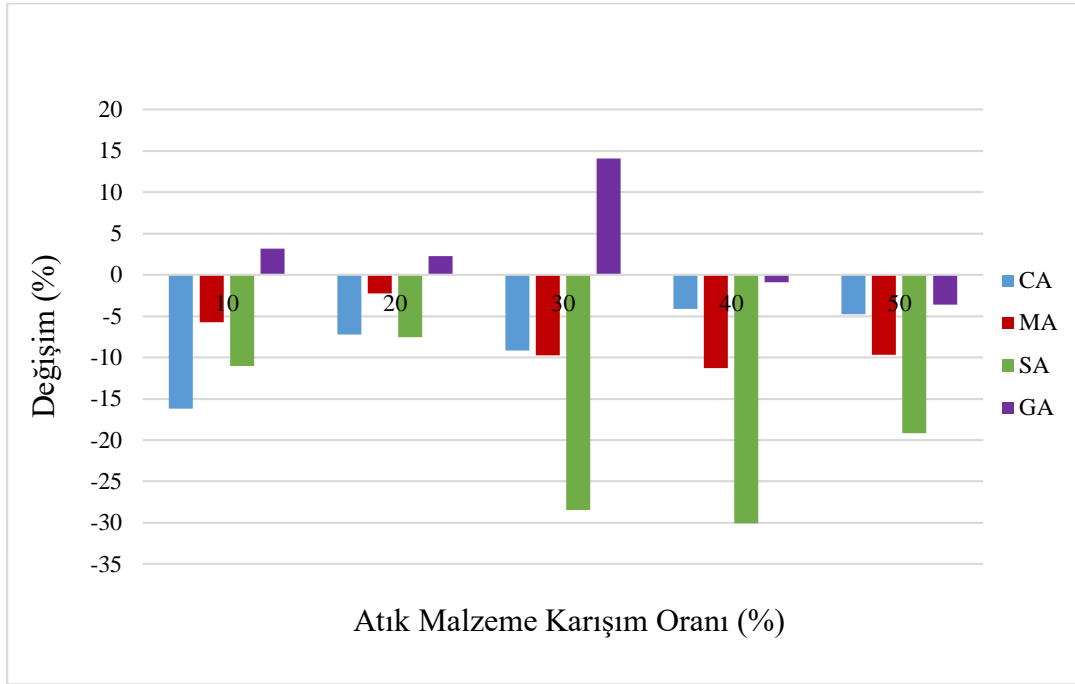
Şekil 4.14 : Su emme-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.

Şekil 4.14 de görüldüğü üzere gaz beton numunelerin su emme değerleri %55,84 ile %91,21 arasında değişmektedir. En düşük su emme değerinin %40 katkılı SA4 serisine en yüksek su emme değerinin %30 granit atığı katkılı GA3 serisine ait olduğu görülmektedir. En düşük su emme değerleri, porozite değerlerinde düşük olduğu seramik atıklı gaz beton örneklerinde gözlemlenmiştir.

Cam, mermer, seramik, granit atıklarının değişik oranlarda kullanılmasıyla üretilen gaz beton numunelerin su emme değerleri kıyaslandığında granit atık kullanılan serilerde daha yüksek su emme değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu seriyi mermer atıkları, daha sonrada cam atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serileri takip etmektedir. En düşük su emme değeri seramik atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serilerinde elde edilmiştir.

En yüksek su emme değerlerinin elde edildiği granit atık kullanılarak üretilen gaz betonların bünyelerinde, atık oranı arttıkça su emme değerlerinin azaldığı Şekil 4.14 ve Çizelge 4.11-4.14 dan anlaşılmaktadır. Bunun sonucu olarak su emme değerleri ile birim hacim ağırlık ve porozite değerlerinin uyumlu olduğu görülmektedir.

Su emme ile atık miktarının yüzdesel değişim ilişkisi Şekil 4.15 de verilmiştir.



Şekil 4.15 : Su emmenin atık miktarına göre yüzdesel değişimi.

Kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamada cam, mermer, seramik atık katkılı tüm örneklerin su emme değerlerinde azalma görülürken granit atık katkılı örneklerde %10, 20, 30 katkı oranlarında artış, %40, 50 oranlarında ise azalma gözlemlenmiştir. Şekil 4.15 de %40 oranında seramik atığının kullanıldığı serinin su emme değeri, kontrol numunesinin (A) su emme değerine göre %30,04 azalmıştır. En yüksek su emme değerinin elde edildiği GA3 serisinde su emme değeri, kontrol numunesinin (A) su emme değerine göre %14,05 artış göstermiştir. Granit atıklı serilerde gözeneklilik ve porozite daha fazla olduğundan su emme oranı da diğerlerine göre daha yüksek elde edilmiştir. Ayrıca granit atıklı serinin birim hacim ağırlık değeri de düşük olduğundan sonuçlar birbiriyle uyumludur.

4.2.4 Kapiler (kılcal) su emme deney sonuçları

TS EN 772-11 e göre yapılan kapiler su emme deneyi sonuçları Çizelge 4.15-4.18 de zamana bağlı olarak kapiler su emme değerlerindeki değişimin grafiksel gösterimleri ise Şekil 4.16-4.19 da verilmiştir.

Çizelge 4.15 : Cam atıklı örneklerin kapiler su emme değerleri.

Örnek No	Kapiler Su Emme [g/(m ² .s ^{0,5})]	Değişim (%)
A	60,074	
CA1	60,261	0,31
CA2	69,534	15,75
CA3	80,893	34,66
CA4	71,095	18,35
CA5	79,173	31,80

Cam atık katkılı gaz beton örneklerinin kapiler su emme değerleri incelendiğinde en düşük değer % 10 atık katkılı CA1 örneğinde 60,07 [g/(m².s^{0,5})], en yüksek değer de %30 atık katkılı CA3 örneğinde 80,89 [g/(m².s^{0,5})] değerinde elde edildiği görülmektedir. Cam atık katkılı seride atık oranı arttıkça kapiler su emme miktarı artış göstermiştir. Kontrol numunesi (A) örneğinin kapiler su emme değeri ile kıyaslama yapıldığında CA4 serisi dışında tüm serilerin kapiler su emme değerlerinin arttığı ve atık miktarı artışına bağlı olarak değişim oranının da genel olarak arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.16 : Mermer atıklı örneklerin kapiler su emme değerleri.

Örnek No	Kapiler Su Emme [g/(m ² .s ^{0,5})]	Değişim (%)
A	60,074	
MA1	81,358	35,43
MA2	77,214	28,54
MA3	92,722	54,35
MA4	92,505	53,99
MA5	90,964	51,43

Çizelge 4.16 da verilen mermer atık katkılı gaz betonların kapiler su emme değerleri en düşük %20 mermer atıklı MA2 serisinde 77,21 [g/(m².s^{0,5})] değeriyle, en yüksek 92,72 [g/(m².s^{0,5})] değeriyle MA3 serisinde elde edilmiştir. Serinin tüm örneklerinde atık oranı arttıkça kapiler su emme değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Kontrol numunesinin (A) kapiler su emme değerleri ile kıyaslandığında tüm örneklerin kapiler su emme değerlerinde artış olduğu ve bu artışın atık oranı artışı ile dalgalı bir seyir izlediği görülmektedir.

Çizelge 4.17 : Seramik atıklı örneklerin kapiler su emme değerleri.

Örnek No	Kapiler Su Emme [g/(m ² .s ^{0,5})]	Değişim (%)
A	60,074	
SA1	67,129	11,75
SA2	62,551	4,12
SA3	60,022	-0,07
SA4	65,795	9,53
SA5	68,421	13,90

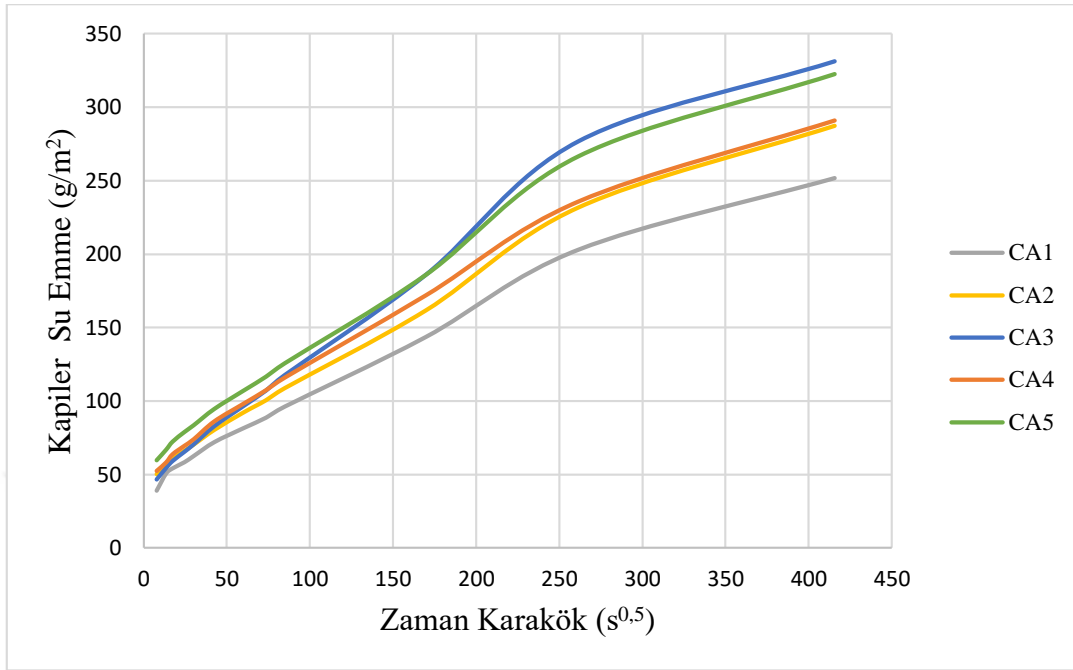
Çizelge 4.17 de verilen seramik atık katkılı örneklerin kapiler su emme değerleri incelendiğinde en yüksek SA5 örneğinde 68,42 [g/(m².s^{0,5})] değeri nin en düşük SA3 örneğinde 60,02 [g/(m².s^{0,5})] değerinin elde edildiği görülmektedir. Örneklerin kapiler su emme miktarları atık oranı %10 iken artmış, %30 seviyesinde iken kontrol numunesine (A) göre azalmış, %40 ve %50 atık seviyesinde yeniden artış göstermiştir.

Çizelge 4.18 : Granit atıklı örneklerin kapiler su emme değerleri.

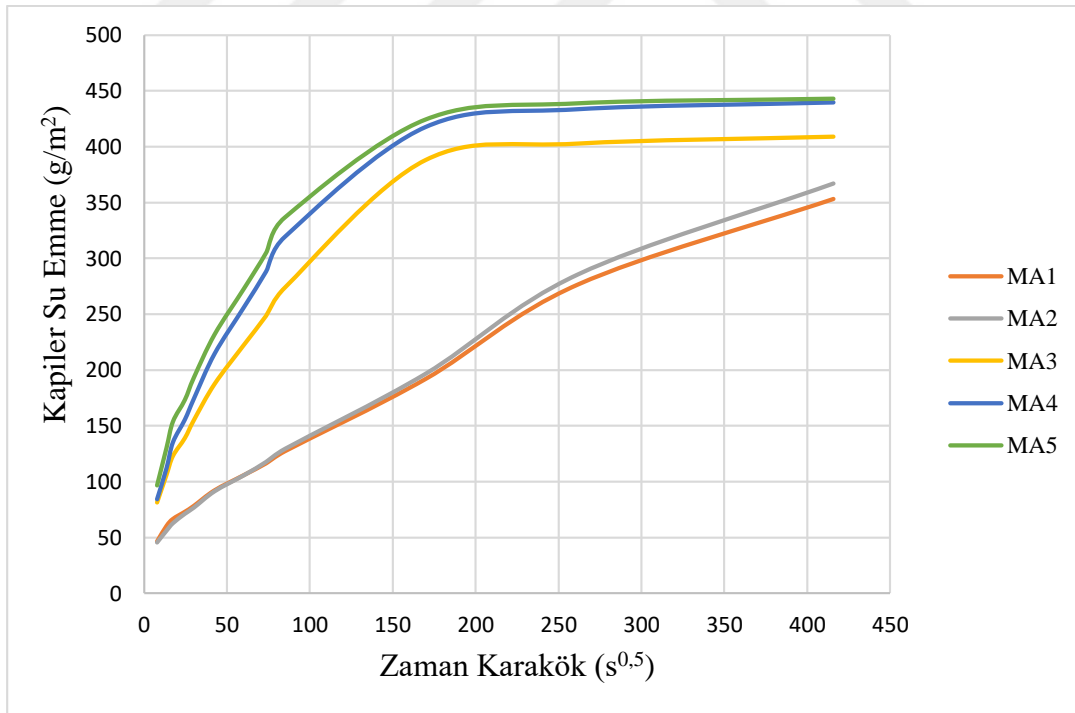
Örnek No	Kapiler Su Emme [g/(m ² .s ^{0,5})]	Değişim (%)
A	60,074	
GA1	89,406	48,83
GA2	67,586	12,51
GA3	70,630	17,57
GA4	83,789	39,48
GA5	84,255	40,26

Çizelge 4.18 de verilen granit atığı ile hazırlanan gaz beton örneklerinin kapiler su emme değerleri incelendiğinde en yüksek değerin 89,40 [g/(m².s^{0,5})] ile GA1 örneğinde en düşük değerin de 67,58 [g/(m².s^{0,5})] değeri ile GA2 serisinde elde edildiği görülmektedir. Örneklerin tümünde granit atık ilavesi kapiler su emmeyi artırıcı yönde etki yapmış, atık oranı %10 iken büyük oranda gelişen bu artış atık oranı %20 ve %30 seviyesine çıktığında düşüş göstermiş daha sonra tekrar artış olmuştur. Kontrol numunesi (A) ile kıyaslama yapıldığında tüm örneklerin kapiler su emme değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu değişim GA1 ve GA5 serilerine ait örneklerde %40 ların üzerindedir.

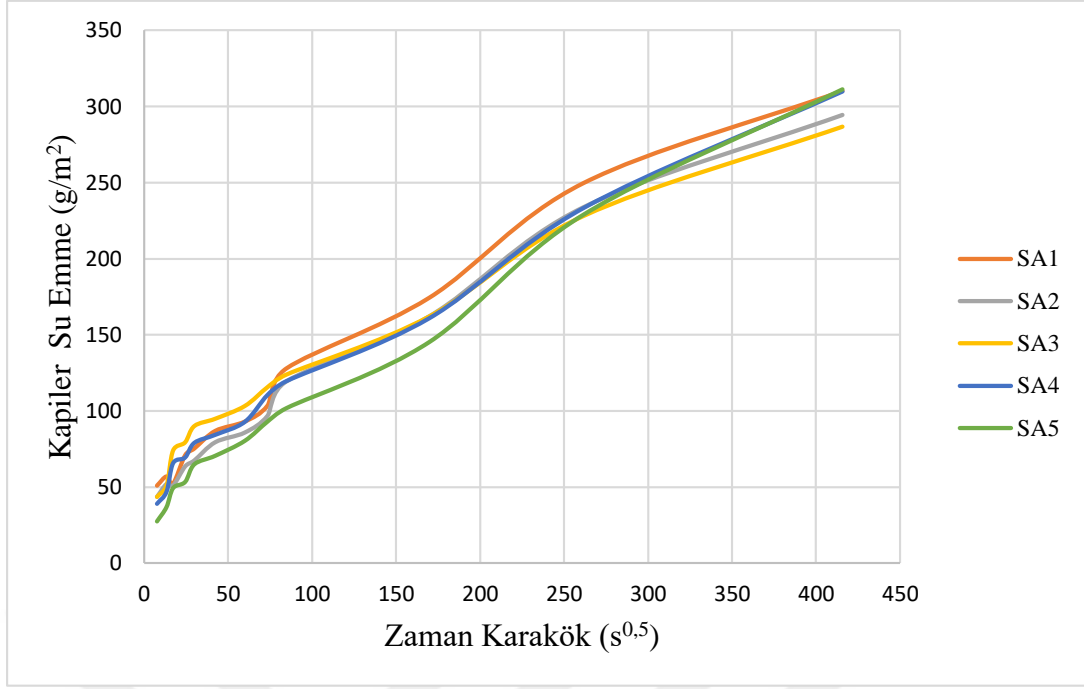
Cam, mermer, seramik ve granit katkılı gaz betonların zamana bağlı olarak kapiler su emme değişimleri grafiksel olarak Şekil 4.16-4.19 da verilmiştir.



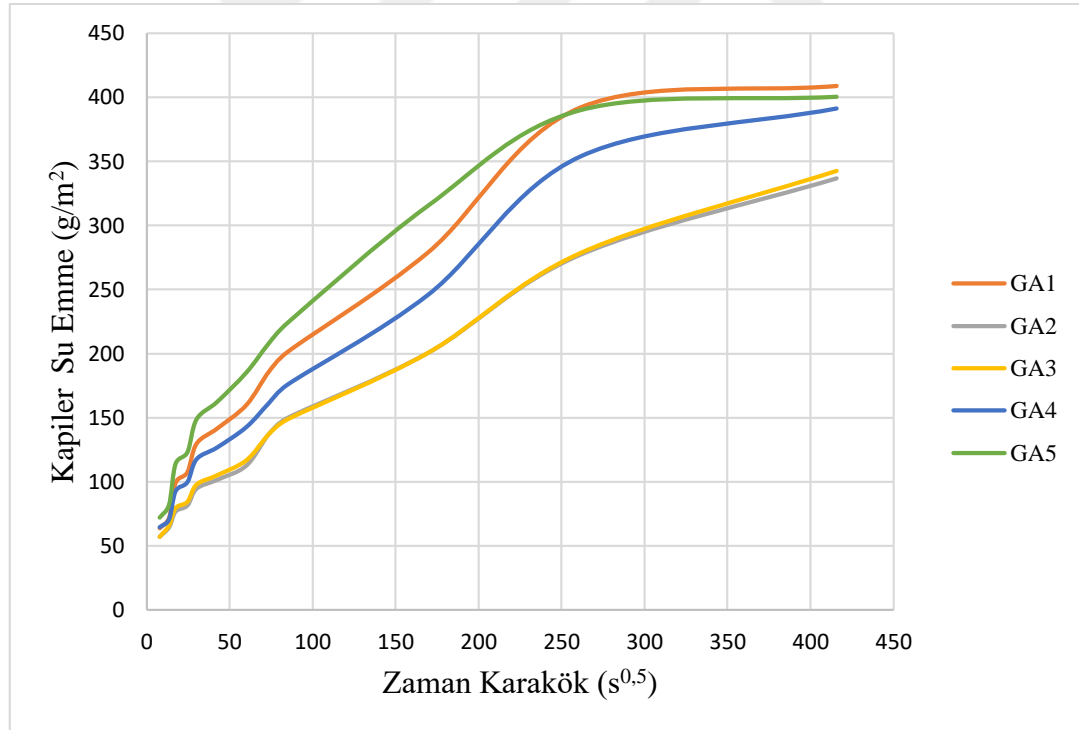
Şekil 4.16 : Cam atık katkılı gaz betonun zamana bağlı olarak kapiler su emme değişimi.



Şekil 4.17 : Mermer atık katkılı gaz betonun zamana bağlı olarak kapiler su emme değişimi.



Şekil 4.18 : Seramik atık katkılı gaz betonun zamana bağlı olarak kapiler su emme değişimi.

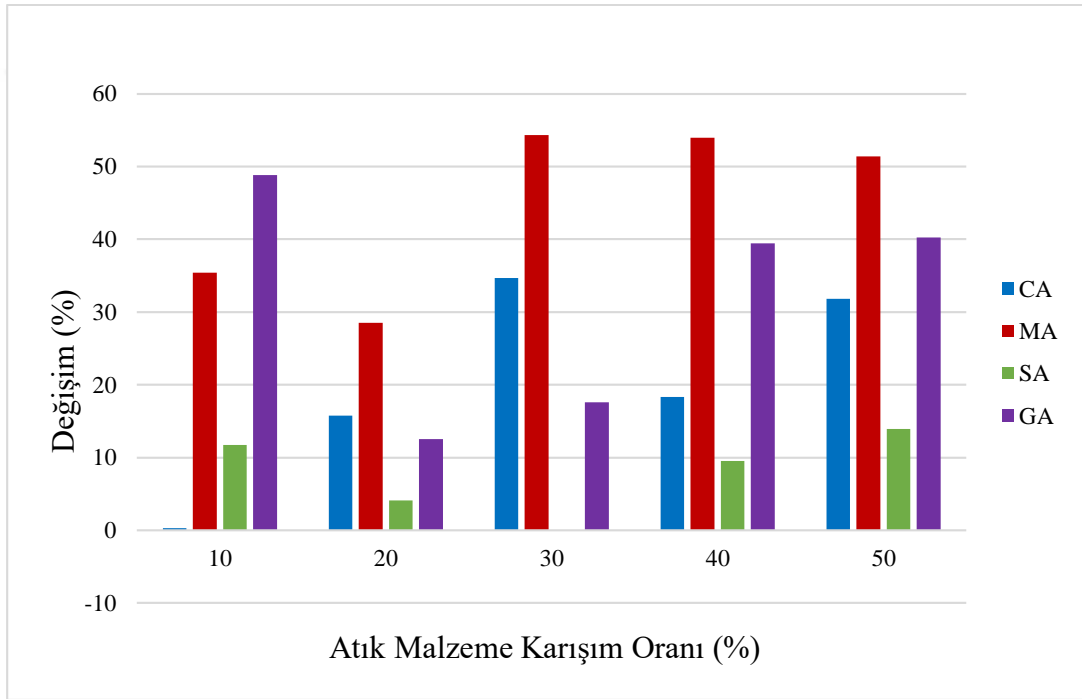


Şekil 4.19 : Granit atık katkılı gaz betonun zamana bağlı olarak kapiler su emme değişimi.

Çizelge 4.15-4.18 incelendiğinde en yüksek kapiler su emme değeri %30 mermer atık oranlı MA3, en düşük kapiler su emme değeri ile %30 seramik atık oranlı SA3 e aittir. Gaz beton numunelerin kapiler su emme değerleri $60,02 \text{ [g/(m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})]$ ile $92,72 \text{ [g/(m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})]$ arasında değişmektedir. Çizelge 4.15-4.18 de verilen kapiler su emme değerleri ve bu değerlerin

kontrol numunesinin (A) değerlerine göre % değişimleri incelendiğinde en yüksek değerlerin mermer atık katkılı örneklerde elde edildiği görülmektedir. Kapiler su emme değerleri gaz beton deney örneklerinin yüzey alanına bağlı kapiler su emme değerlerinin zamanın karekökü ile değişim grafikleri incelendiğinde örneklerde belirli bir süreye kadar hızlı, bir süre sonra daha yavaş su emmenin gerçekleştiği görülmektedir. Cam ve seramik atıklı örneklerin kapiler su emmesi, kontrol numunesinin (A) kapiler su emme değerine daha yakındır. En yüksek kapiler su emme değerlerinin mermer atıklı gaz beton örneklerinde olduğu görülmüştür.

Kapiler su emmenin atık miktarına göre yüzdesel değişimi Şekil 4.20 de verilmiştir.



Şekil 4.20 : Kapiler su emmenin atık miktarına göre yüzdesel değişimi.

Kapiler su emmenin atık miktarına göre yüzdesel değişimini veren Şekil 4.20 incelendiğinde, tüm örneklerin kontrol numunesinin (A) kapiler su emme değerine göre artış gösterdiği, bu artışın en fazla mermer atığı kullanılan serilerde, en az da seramik atığı kullanılan serilerde gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 4.20 e göre %30 oranında seramik atığının kullanıldığı serinin kapiler su emme değeri, kontrol numunesinin (A) kapiler su emme değerine göre %0,07 azalmıştır. En yüksek kapiler su emme değerinin elde edildiği MA3 serisinde kapiler su emme değeri, kontrol numunesinin (A) kapiler su emme değerine göre %54,35 artış göstermiştir.

4.2.5 Nem içeriği deney sonuçları

TS EN 772-10 a göre yapılan nem içeriği deney sonuçları Çizelge 4.19-4.22 de verilmiştir.

Çizelge 4.19 : Cam atıklı örneklerin nem içeriği değerleri.

Örnek No	Nem İçeriği (%)					
	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
1	2,61	3,96	6,31	6,56	5,70	12,26
2	2,47	4,04	5,67	5,69	5,60	15,02
3	2,36	5,17	3,98	6,65	5,45	14,38
4	2,07	3,47	6,58	6,29	8,16	14,27
5	2,15	3,88	5,39	4,92	6,57	14,70
6	2,04	4,92	3,19	5,33	6,55	10,93
Ort	2,28±0,23	4,24±0,66	5,19±1,34	5,91±0,7	6,34±1,02	13,6±1,63
Değişim (%)		86,02	127,49	159,12	177,96	496,30

Çizelge 4.19 da verilen cam atık kullanılarak hazırlanan gaz beton örneklerinin nem içeriği değerleri en düşük %4,24 ile CA1 serisinde, en yüksek %13,6 değeri ile CA5 serisinde elde edilmiştir. Serilerin tümünde nem içeriği atık miktarındaki artışa bağlı olarak artış göstermiştir. Kontrol numunesinin (A), nem içeriği değerleri ile kıyaslama yapıldığında serilerin atık miktarları arttıkça %496,30 değerlerine varan değişim oranlarında artış gözlemlenmiştir. Serilerin yüzde değişimlerinde meydana gelen artışlar, atık miktarının artışıyla doğru orantılı olarak değişmiştir.

Çizelge 4.20 : Mermer atıklı örneklerin nem içeriği değerleri.

Örnek No	Nem İçeriği (%)					
	A	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
1	2,61	6,64	3,80	3,80	2,32	2,02
2	2,47	8,42	5,77	5,63	2,60	1,93
3	2,36	6,05	5,18	3,71	2,44	1,79
4	2,07	5,19	5,60	4,86	2,48	1,92
5	2,15	7,65	7,44	7,27	2,91	2,28
6	2,04	5,73	5,62	4,76	3,28	2,69
Ort.	2,28±0,23	6,61±1,22	5,57±1,17	5,01±1,32	2,67±0,36	2,1±0,33
Değişim (%)		190,05	144,10	119,53	17,14	-7,76

Çizelge 4.20 de verilen mermer atık katkılı gaz beton örneklerine ait nem içeriği değerleri incelendiğinde değerlerin en yüksek %6,61 ile MA1 serisine, en düşük %2,1 değeri ile MA5 serisine ait olduğu görülmektedir. Mermer atık oranı arttıkça nem içeriği düşüş eğiliminde olmuştur. Serilerin nem içeriği kontrol numunesi (A) ile kıyaslandığında en yüksek nem içeriğine sahip olan MA1 serisinde %190,05, MA5 örneğinde %7,76 lık değişim belirlenmiştir.

Çizelge 4.21 : Seramik atıklı örneklerin nem içeriği değerleri.

Örnek No	Nem İçeriği (%)					
	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
1	2,61	35,36	22,49	30,93	27,74	39,13
2	2,47	39,58	25,73	23,59	25,46	37,26
3	2,36	40,57	24,77	24,72	28,34	41,45
4	2,07	23,84	20,81	19,30	26,65	29,37
5	2,15	27,48	27,42	15,37	24,71	29,62
6	2,04	25,52	19,90	18,30	27,01	26,62
Ort.	2,28±0,23	32,06±7,36	23,52±2,94	22,04±5,56	26,65±1,37	33,91±6,12
Değişim (%)		1306,04	931,52	866,46	1068,90	1387,17

Seramik atık kullanılarak üretilen gaz beton örneklerinin nem içeriği değerleri incelendiğinde en düşük değer %22,04 değeri ile SA3 serisine, en yüksek değeri ise %33,91 değeri ile SA5 serisine ait olduğu görülmektedir. Seramik atık katkısının gaz betonun nem içeriğini önemli ölçüde artırdığı elde edilen sonuçlardan görülmektedir. Bu durumun seramik bünyesinde bulunan pişmiş kil varlığından ve seramik atığının porozlu yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [108].

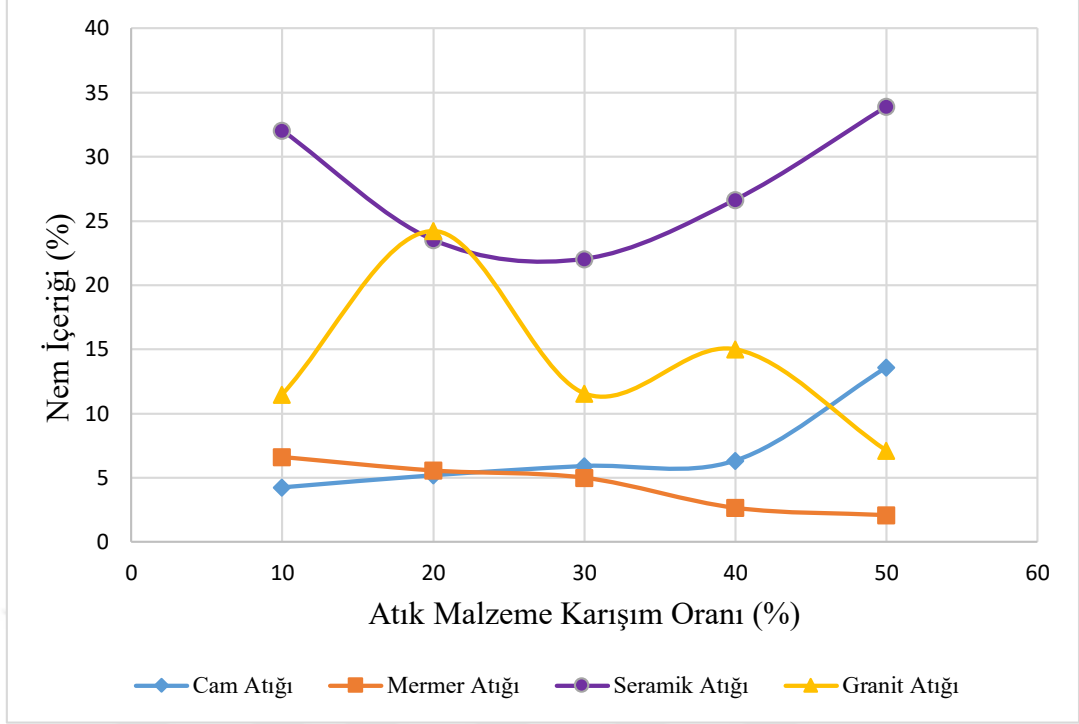
Kontrol numunesi (A) ile yapılan karşılaştırmalarda %10 seramik atık kullanılan serinin nem içeriği artmış, atık oranı %20, %30 olduğunda bir miktar azalma meydana gelmiş daha sonra %40 ve %50 atık oranlarında yine artış meydana gelmiştir.

Çizelge 4.22 : Granit atıklı örneklerin nem içeriği değerleri.

Örnek No	Nem İçeriği (%)					
	A	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5
1	2,61	11,97	24,36	17,81	20,22	7,67
2	2,47	15,17	31,29	12,10	18,47	9,75
3	2,36	12,91	24,59	11,34	11,45	2,93
4	2,07	9,01	23,55	10,85	17,09	5,98
5	2,15	12,39	20,01	10,51	14,29	9,44
6	2,04	7,45	21,50	6,81	8,51	6,91
Ort.	2,28±0,23	11,48±2,8	24,21±3,9	11,57±3,57	15±4,45	7,11±2,51
Değişim (%)		403,6	961,96	407,47	558,04	211,91

Çizelge 4.22 de verilen granit atık katkılı gaz betonların nem içeriği değerleri incelendiğinde GA5 serisinde %7,11 ile en düşük, GA2 serisinde %24,21 ile en yüksek değerlerin elde edildiği görülmektedir. Granit atıklı serilerin tümünde atık ilavesi nem içeriğinin artmasına neden olmuştur. Ancak bu değişim atık oranlarının artışıyla orantılı olmamıştır. Kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamalarda %10 ve %30 atık kullanılan serilerde benzer artış oranı elde edilmiş, bu oranlar %40 ve %20 atık oranlı serilerde yükselirken %50 atık oranlı seride azalmıştır.

Nem içeriği ile atık malzeme karışım oranı ilişkisi grafiksel olarak Şekil 4.21 de verilmiştir.



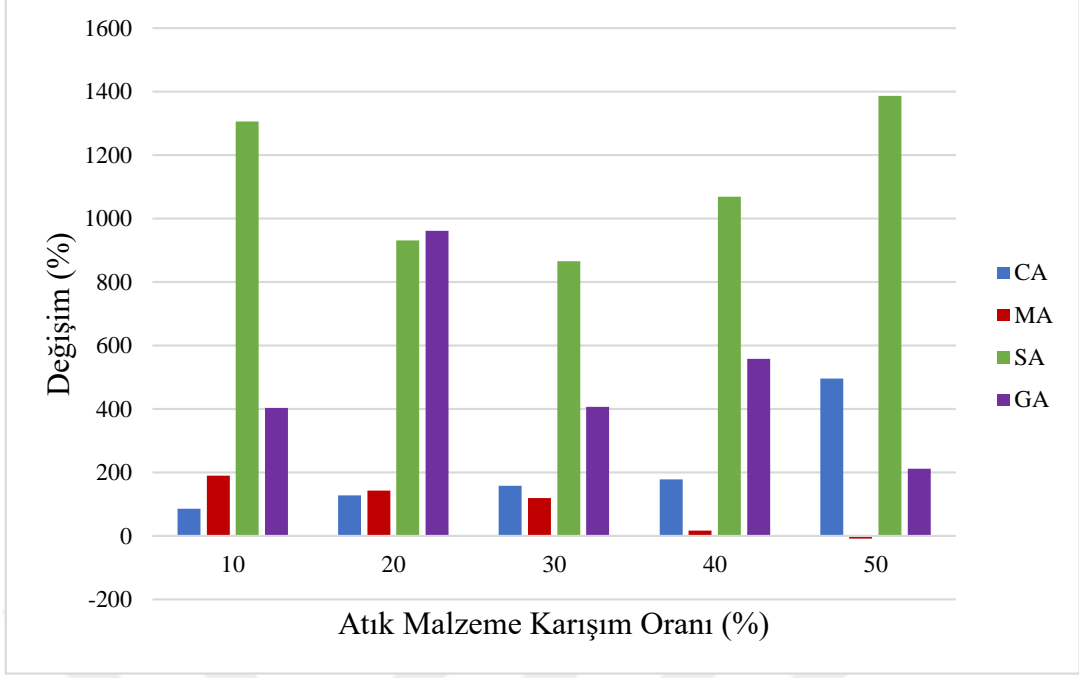
Şekil 4.21 : Nem içeriği-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.

Çizelge 4.19-4.22 ve Şekil 4.21 incelendiğinde cam, mermer, seramik, granit atıklarının değişik oranlarda kullanılmasıyla üretilen gaz beton numunelerin nem içeriği değerleri kıyaslandığında seramik atık kullanılan serilerde daha yüksek nem içeriği değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu seriyi granit atıkları, daha sonrada cam atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serileri takip etmektedir. En düşük nem içeriği değeri mermer atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serilerinde elde edilmiştir.

En yüksek nem içeriği değerlerinin elde edildiği seramik atık kullanılarak üretilen gaz betonların bünyelerinde atık oranının %20 ve %30 da azaldığı, %40 ve %50 de nem içeriği değerlerinin arttığı Şekil 4.21 ve Çizelge 4.19-4.22 den anlaşılmaktadır.

Şekil 4.21 incelendiğinde en yüksek nem içeriği değerinin %50 seramik atık oranlı SA5, en düşük nem içeriği değerinin ise %50 mermer atık oranlı MA5 e ait olduğu görülmüştür. Gaz beton numunelerinin nem içeriği değerleri 2,103 ile 33,908 arasında değişmektedir.

Nem içeriğinin atık katkılarına göre değerlerin değişim grafiği Şekil 4.22 de verilmiştir.



Şekil 4.22 : Nem içeriğinin atık miktarına göre yüzdesel değişimi.

Cam, mermer, seramik ve granit atıkları kullanılarak üretilen gaz betonların nem içeriğinin yüzdesel değişimlerinin grafiksel olarak gösterildiği Şekil 4.22 incelendiğinde atık katkısının tüm örneklerde nem içeriğinin artmasına neden olduğu görülmektedir. Özellikle seramik ve granit atığı katkılı örneklerde bu artış yüksek değerlerde elde edilmiştir. Mermer atığı kullanılarak üretilen gaz beton örneklerinde ise en düşük artış oranları elde edilmiştir.

Şekil 4.22 de verilen değişim oranlarının grafiksel gösterimi incelendiğinde %50 oranında mermer atığının kullanıldığı serinin nem içeriği değeri, kontrol numunesinin (A), nem içeriği değerine göre %7,76 azalmış, en yüksek nem içeriği değerinin elde edildiği SA5 serisinde nem içeriği değeri kontrol numunesinin (A), nem içeriği değerine göre %1387,1 artış göstermiştir.

4.2.6 Basınç dayanımı deney sonuçları

TS EN 772-1 ve TS EN 771-4:2011+A1 e standardına göre yapılan basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.23-4.26 da verilmiştir.

Çizelge 4.23 : Cam atıklı örneklerin basınç dayanımı değerleri.

Örnek No	Basınç Dayanımı (MPa)					
	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
1	1,07	1,93	1,99	1,91	1,33	1,47
2	1,38	1,86	1,93	1,99	1,81	1,30
3	1,31	2,17	1,99	1,99	1,42	1,18
Ort	1,25±0,16	1,99±0,16	1,97±0,03	1,97±0,05	1,52±0,26	1,32±0,15
Değişim (%)		59,2	57,6	57,6	21,6	5,6

Çizelge 4.23 de verilen cam atıklı gaz beton örneklerinin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde en düşük CA5 serisinde 1,32 MPa, en yüksek de CA1 serisinde 1,99 MPa değerinin elde edildiği görülmektedir. Tüm katkı oranlarında elde edilen basınç dayanımı değerleri, kontrol numunesi (A) basınç dayanımı değerinden yüksek çıkmıştır. En yüksek değer CA1 serisinde elde edilirken, atık oranı artışının, basınç dayanımını ters orantılı olarak etkileyerek azalmasına neden olduğu görülmektedir. Bu durumun atık miktarı arttıkça silis içeriğinin ve buna bağlı olarak tobermorit oluşumunun azalmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Çizelge 4.24 : Mermer atıklı örneklerin basınç dayanımı değerleri.

Örnek No	Basınç Dayanımı (MPa)					
	A	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
1	1,07	1,66	1,19	0,72	0,49	0,30
2	1,38	1,52	1,37	0,69	0,46	0,46
3	1,31	1,63	1,44	0,86	0,44	0,51
Ort	1,25±0,16	1,6±0,07	1,33±0,13	0,76±0,09	0,46±0,03	0,42±0,11
Değişim (%)		28	6,4	-39,2	-63,2	-66,4

Mermer atık katkılı gaz beton örneklerinin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde en yüksek değer 1,6 MPa değeri ile MA1 serisinde, en düşük 0,42 MPa değeri ile MA5 serisinde elde edildiği görülmektedir. Kontrol numunesi (A) nın basınç dayanımı değerleri

ile yapılan kıyaslamalarda mermer atığı ilavesinin %10 ve %20 olduğu MA1 ve MA2 serilerinde basınç dayanımı değerinin kontrol numunesinin (A) değerinden yüksek iken, %30, %40 ve %50 olduğu MA3, MA4 ve MA5 serilerinde düşüş gösterdiği görülmektedir. Mermer atık katkısı %20 oranına kadar basınç dayanımına olumlu etki yaparken, %30 ve üzeri oranlarda olumsuz yönde etki yapmıştır.

Çizelge 4.25 : Seramik atıklı örneklerin basınç dayanımı değerleri.

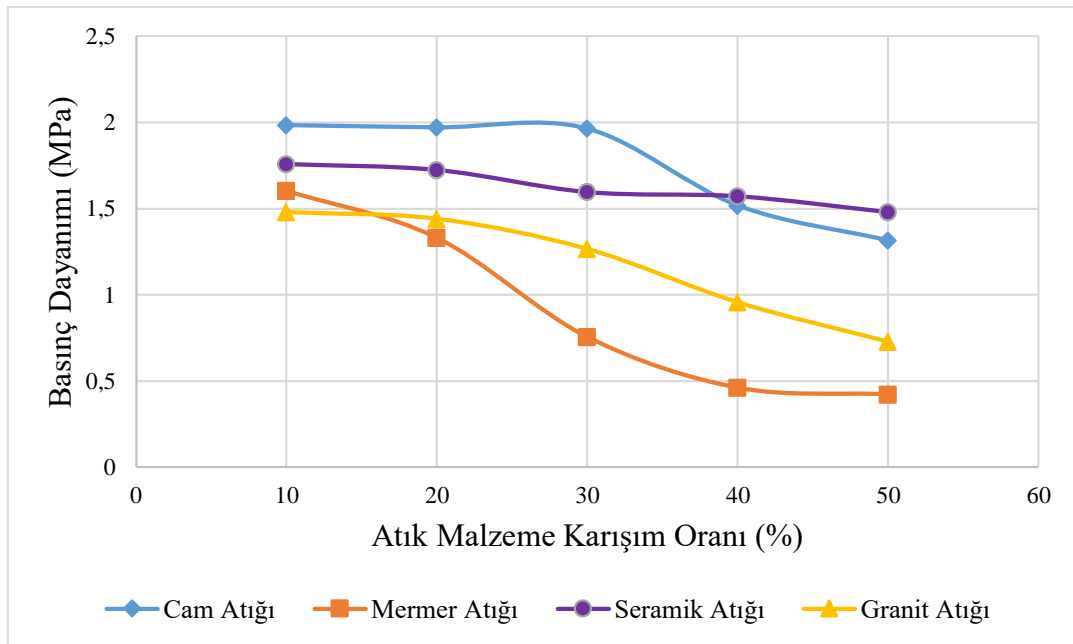
Örnek No	Basınç Dayanımı (MPa)					
	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
1	1,07	1,79	1,54	1,63	1,70	1,58
2	1,38	1,78	1,70	1,65	1,65	1,56
3	1,31	1,71	1,937	1,51	1,37	1,30
Ort	1,25±0,16	1,76±0,04	1,72±0,2	1,6±0,08	1,57±0,18	1,48±0,16
Değişim (%)		40,8	37,6	28	25,6	18,4

Seramik atık katkısı ile üretilen gaz beton örneklerinin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde en yüksek SA1 serisinde 1,76 MPa, en düşük SA5 serisinde 1,48 MPa değerinin elde edildiği görülmektedir. Kontrol numunesinin (A) basınç dayanımı değerleri seramik atık katkılı seriler ile kıyaslandığında tüm serilerde artışın söz konusu olduğu görülmektedir. Bu artış en fazla SA1 serisinde en az SA5 serisinde elde edilmiştir. Atık oranının artışına bağlı olarak basınç dayanımı değerleri doğru orantılı şekilde düşmüştür.

Çizelge 4.26 : Granit atıklı örneklerin basınç dayanımı değerleri.

Örnek No	Basınç Dayanımı (MPa)					
	A	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5
1	1,07	1,46	1,50	1,27	0,98	0,65
2	1,38	1,51	1,47	1,27	0,96	0,73
3	1,31	1,48	1,35	1,26	0,94	0,80
Ort	1,25±0,16	1,48±0,03	1,44±0,08	1,27±0,01	0,96±0,02	0,73±0,08
Değişim (%)		18,4	15,2	1,6	-23,2	-41,6

Çizelge 4.26 da verilen granit atık katkı gaz betonların basınç dayanımı değerlerinin en yüksek GA1 serisinde 1,48 MPa, en düşük GA5 serisinde 0,73 MPa olarak elde edildiği görülmektedir. Kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamada granit atık katkısı %10-30 katkı oranlarında basınç dayanımına olumlu yönde etki ederek artmasına neden olmuş ancak bu aralıkta katkı oranı arttıkça basınç dayanımı düşme eğilimi sergilemiştir. %40 ve %50 oranlarında ise atık katkısının, basınç dayanımında azalmaya neden olduğu görülmektedir. Gaz beton serilerine ait basınç dayanımı ile atık malzeme karışım oranlarının grafiksel gösterimi Şekil 4.23 de verilmiştir.

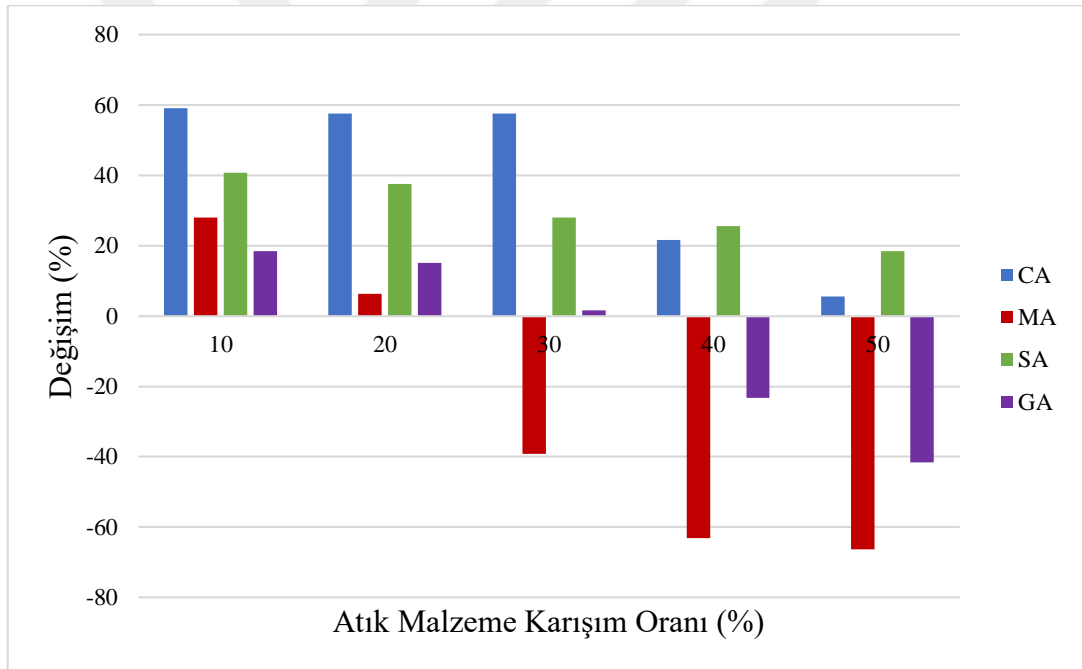


Şekil 4.23 : Basınç dayanımı-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.

Şekil 4.23 incelendiğinde gaz beton numunelerinin basınç dayanımı değerlerinin 0,423 MPa ile 1,99 MPa arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı değeri %10 cam atık oranlı CA1, en düşük basınç dayanımı değeri ise %50 mermer atık oranlı MA5 e aittir. En düşük basınç dayanımı değerlerinin mermer atıklı gaz beton örneklerde olduğu görülmüştür. Atıklardaki silis miktarı azaldıkça basınç dayanımının düştüğü belirlenmiştir. Atık oranının artması ile basınç dayanımı azalmaktadır. Bu azalma seramik atıklı numunelerde, doğrusala yakın iken mermer ve granit atıklı numunelerde %30 dan sonra büyük oranda gelişmiştir.

En yüksek basınç dayanımı değerlerinin elde edildiği cam atık kullanılarak üretilen gaz betonların bünyelerinde atık oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin düştüğü Şekil 4.23 ve Çizelge 4.23-4.26 dan anlaşılmaktadır.

Basınç dayanımının atık miktarına göre yüzdesel değişimi Şekil 4.24 de verilmiştir.



Şekil 4.24 : Basınç dayanımının atık miktarına göre yüzdesel değişimi.

Şekil 4.24 de %50 oranında cam atığının kullanıldığı serinin basınç dayanımı değeri, kontrol numunesinin (A) basınç dayanım değerine göre %5,6 artmıştır. En yüksek basınç dayanımı değerlerinin elde edildiği CA1 serisinde basınç dayanımı değerleri kontrol numunesinin (A) basınç dayanımına göre %59,2, CA2 ve CA3 serisinde %57,6, CA4 serisinde %21,6 artış göstermiştir. Çizelge 2.4 de verilen basınç dayanım değerlerine yakın sonuçlar çıkmış, otoklav kürünün ayarlanması ile basınç dayanım değerlerinin artacağı düşünülmektedir.

4.2.7 Ultrasonik dalga hızı deney sonuçları

Betonun içerisinde geçen dalganın hızı ile beton dayanımı arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Ancak ses üstü dalganın hızı ile betonun yoğunluğu arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu düşük olan bir betonda, yani, içerisinde daha çok boşluk bulunan betonda, ses üstü dalganın betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça, ses üstü dalganın hızı daha düşük olmaktadır. TS EN 12504-4 ile belirtilen yöntemle göre Çizelge 4.27-4.30 da atık katkı karışımların ultrasonik dalga hızı değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.27 : Cam atıklı örneklerin ultrasonik dalga hızı değerleri.

Örnek No	Ultrasonik Dalga Hızı (m/s)					
	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
1	1063,88	1228,5	1326,4	1514,6	1452,1	1173,96
2	1073,33	1412,07	1014,56	1539,31	1364,53	1389,43
3	1238,33	1269,34	1185,66	1478,69	1500,85	1415,69
4	1420,58	1605,5	1338,51	1525,07	1470,1	1173,30
5	1445,09	1353,01	1499,11	1350,86	1343,56	1446,24
6	1404,03	1383,2	1328,04	1477,7	1454,48	1229,33
Ort.	1274,2±175,1	1375,27±132,4	1282,05±164,5	1481,04±68,4	1430,94±62,4	1304,66±126,1
Değişim (%)		7,93	0,61	16,7	12,3	2,39

Çizelge 4.27 de verilen cam atıklı gaz beton örneklerinin ultrasonik dalga hızı değerleri incelendiğinde en düşük CA2 serisinde 1282,05 m/s, en yüksek CA3 serisinde 1481,04 m/s değerinin elde edildiği görülmektedir. Kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamada tüm atık oranlarında elde edilen değerlerin kontrol numunesinin (A), ultrasonik dalga hızı değerlerine göre artış gösterdiği, bu eğilimin en fazla CA3 serisinde %16,7 oranı ile gerçekleştirdiği görülmektedir. Ultrasonik dalga hızı değerlerinde %20, %40, %50 atık katkı serilerde azalış, %30 atık katkı seride artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.28 : Mermer atıklı örneklerin ultrasonik dalga hızı değerleri.

Örnek No	Ultrasonik Dalga Hızı (m/s)					
	A	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
1	1063,88	1471,05	1164,38	1281,67	970,847	892,91
2	1073,33	1288,64	1448,52	1181,78	1008,47	883
3	1238,33	1264,19	1129,14	1042,11	1004,04	957,52
4	1420,58	1402,19	1460,50	958,20	980,82	918,36
5	1445,09	1447,77	1294,93	1013,79	887,09	952,29
6	1404,03	1340,44	1141,04	913,69	918,34	936,68
Ort.	1274,2±175,1	1369,05±84,8	1273,09±152,5	1065,21±140	961,6±48,7	923,46±30,9
Değişim (%)		7,44	-0,08	-16,4	-24,53	-27,52

Çizelge 4.28 de verilen mermer atıklı gaz beton örneklerinin ultrasonik dalga hızı değerleri incelendiğinde en düşük MA5 serisinde 923,46 m/s, en yüksek MA2 serisinde 1273,09 m/s değerinin elde edildiği görülmektedir. Kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamada tüm atık oranlarında elde edilen değerlerin kontrol numunesinin (A), ultrasonik dalga hızı değerlerine göre azalış gösterdiği, bu eğilimin en fazla MA5 serisinde %27,52 oranı ile gerçekleştirdiği görülmektedir. Ultrasonik dalga hızı değerlerinde %20 atık katkılı seride artış, diğer atık katkılı serilerde azalış gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.29 : Seramik atıklı örneklerin ultrasonik dalga hızı değerleri.

Örnek No	Ultrasonik Dalga Hızı (m/s)					
	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
1	1063,88	1435,67	1275,21	1655,50	1487,84	1736,59
2	1073,33	1180,64	1360,20	1274,39	1489,85	1587,31
3	1238,33	1219,80	1281,13	1450,14	1498,28	1691,30
4	1420,58	1176,72	1381,17	1701,92	1330,82	1400,89
5	1445,09	1419,76	1583,26	1411,16	1499,86	1400
6	1404,03	1312,25	1272,11	1455,63	1272,77	1639,47
Ort.	1274,2±175,13	1290,81±116,8	1358,85±119,5	1491,46±159,9	1429,9±101	1575,93±144,8
Değişim (%)		1,3	6,64	17,05	12,21	23,67

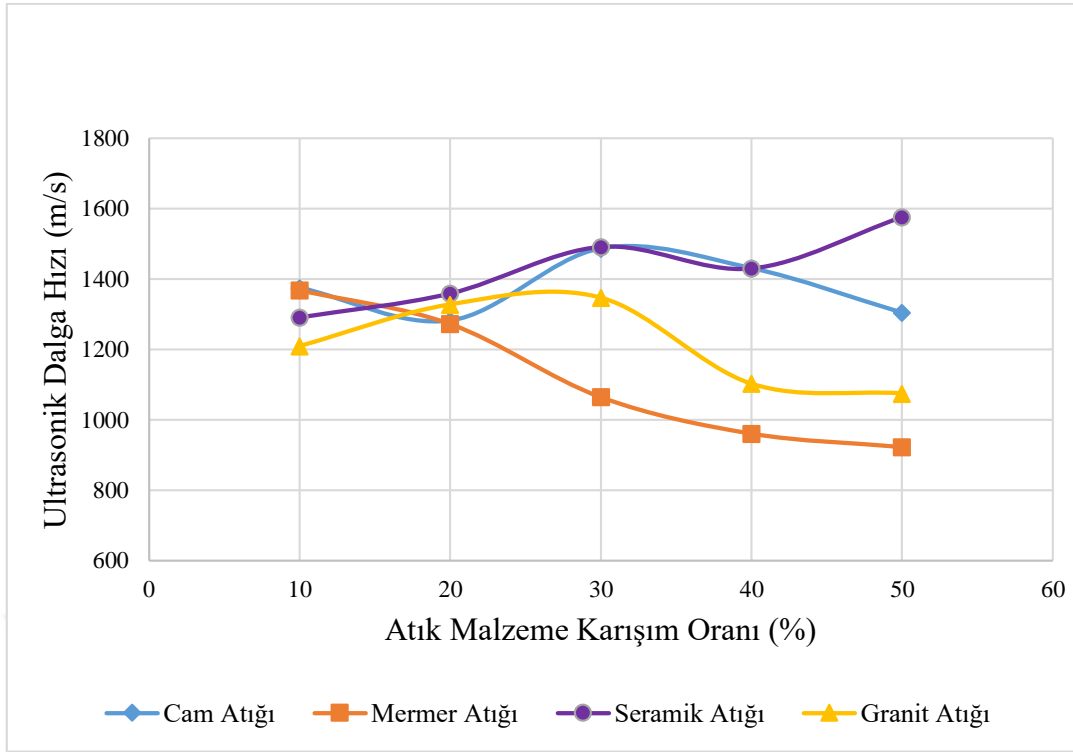
Çizelge 4.29 da verilen seramik atıklı gaz beton örneklerinin ultrasonik dalga hızı değerleri incelendiğinde en düşük SA1 serisinde 1290,81 m/s, en yüksek SA5 serisinde 1575,93 m/s değerinin elde edildiği görülmektedir. Kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamada tüm atık oranlarında elde edilen değerlerin kontrol numunesinin (A), ultrasonik dalga hızı değerlerine göre artış gösterdiği, bu eğilimin en fazla SA5 serisinde %23,67 oranı ile gerçekleştirdiği görülmektedir. Ultrasonik dalga hızı değerlerinde doğrusal olarak tüm atık katkılı serilerde artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.30 : Granit atıklı örneklerin ultrasonik dalga hızı değerleri.

Örnek No	Ultrasonik Dalga Hızı (m/s)					
	A	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5
1	1063,88	1282,19	1256,79	1334,86	1120,45	1063,100
2	1073,33	1244,25	1358,85	1268,6	1133,06	1056,31
3	1238,33	1342,11	1366,09	1256,12	1062,37	1092,72
4	1420,58	1123,20	1198,93	1412,72	1021,09	1110,80
5	1445,09	1117,12	1412,65	1362,79	1063,70	1061,97
6	1404,03	1149,48	1375,51	1448,93	1215,72	1066,27
Ort.	1274,2±175,13	1209,72±93,4	1328,14±81,9	1347,34±76,8	1102,73±69	1075,19±21,6
Değişim (%)		-5,06	4,45	5,73	-13,45	-15,61

Çizelge 4.30 da verilen granit atıklı gaz beton örneklerinin ultrasonik dalga hızı değerleri incelendiğinde en düşük GA5 serisinde 1075,19 m/s, en yüksek GA3 serisinde 1347,34 m/s değerinin elde edildiği görülmektedir. Kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamada %10, %40 ve %50 oranlarında ultrasonik dalga hızı değerlerinde azalış, diğer atık oranlarında artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Bu azalış eğiliminin en fazla GA5 serisinde %15,61 oranı ile gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

Gaz beton serilerine ait ultrasonik dalga hızı ile atık malzeme karışım oranlarının grafiksel gösterimi Şekil 4.25 de verilmiştir.



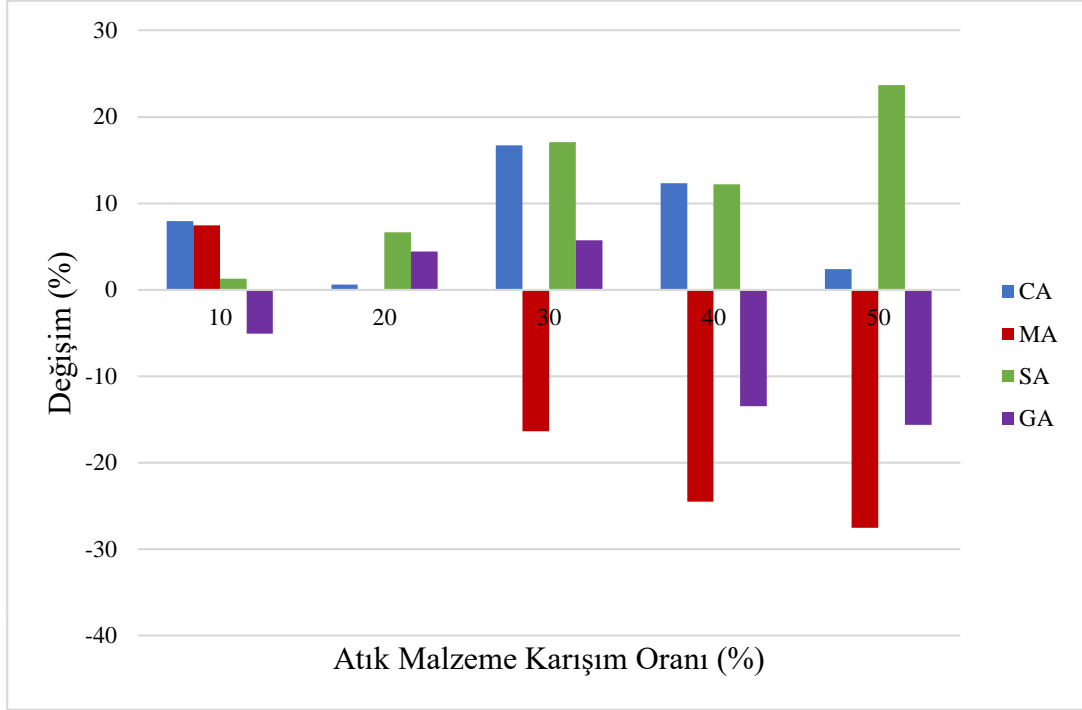
Şekil 4.25 : Ultrasonik dalga hızı-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.

Şekil 4.25 de görüldüğü gibi en düşük ultrasonik dalga hızı değerinin %50 katkıli MA5 mermer atığına, en yüksek ultrasonik dalga hızı değerinin %50 katkıli SA5 seramik atığına ait olduğu belirlenmiştir. Gaz beton numunelerin ultrasonik dalga hızı değerleri 923,459 m/s ile 1575,926 m/s arasında değişmektedir.

Çizelge 4.27-4.30 ve Şekil 4.25 incelendiğinde cam, mermer, seramik, granit atıklarının değişik oranlarda kullanılmasıyla üretilen gaz beton numunelerin ultrasonik dalga hızı değerleri kıyaslandığında seramik atık kullanılan serilerde daha yüksek ultrasonik dalga hızı değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu seriyi cam atıkları, daha sonrada granit atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serileri takip etmektedir. En düşük ultrasonik dalga hızı değeri mermer atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serilerinde elde edilmiştir.

En yüksek ultrasonik dalga hızı değerlerinin elde edildiği seramik atık kullanılarak üretilen gaz betonların bünyelerinde atık oranı %20, %30 ve %50 da arttığı, %40 da ultrasonik dalga hızı değerlerinin azaldığı Şekil 4.25 ve Çizelge 4.27-4.30 den anlaşılmaktadır. Bu durum birim hacim ağırlığı değerlerinin seramik ve mermer atık kullanılan serilerde daha yüksek çıkmasından kaynaklanmıştır.

Ultrasonik dalga hızınının atık miktarına göre yüzdesel değişimi Şekil 4.26 da verilmiştir.



Şekil 4.26 : Ultrasonik dalga hızının atık miktarına göre yüzdesel değişimi.

Şekil 4.26 da %50 oranında mermer atığının kullanıldığı serinin ultrasonik dalga hızı değeri, kontrol numunesinin (A) ultrasonik dalga hızı değerine göre %27,52 azamıştır. En yüksek ultrasonik dalga hızı değerinin elde edildiği SA5 serisinde ultrasonik dalga hızı değeri, kontrol numunesinin (A) ultrasonik dalga hızı değerine göre %23,67 artış göstermiştir.

4.3 Termik Bulgular

4.3.1 Isıl iletkenlik deney sonuçları

ASTM C518, EN 12664, EN 12667 ve ISO 8301 de belirtilen şartlara uygun olarak belirlenen sonuçlar ve kontrol numunesine (A) göre % değişimleri Çizelge 4.31-4.34 de, ısı iletkenlik ile atık malzeme karışım oranları ilişkisi Şekil 4.27 de verilmiştir.

Çizelge 4.31 : Cam atıklı örneklerin ısı iletkenlik değerleri.

Örnek No	Isıl İletkenlik Değeri (W/mK)					
	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
1	0,1090	0,1310	0,1240	0,1220	0,1250	0,1230
2	0,1080	0,1570	0,1220	0,1130	0,1140	0,1040
Ort.	0,1085±0,0007	0,1440±0,018	0,1230±0,001	0,1175±0,006	0,1195±0,007	0,1135±0,013
Değişim (%)		33,33	13,88	8,79	10,64	5,09

Çizelge 4.31 e göre cam atık katkılı gaz beton örneklerinin ısı iletkenlik değerleri en yüksek 0,144 W/mK değeri ile CA1 serisinde, en düşük 0,1135 W/mK değeri ile CA5 serisinde elde edilmiştir. Kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamada tüm atık oranlarında örneklerin ısı iletkenlik değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Bu artış en fazla CA1 serisinde %33,33 oranı ile en düşük CA5 serisinde %5,09 değeri ile elde edilmiştir. Atık oranı artışı ile ısı iletkenlik arasında doğrusala yakın bir ilişki bulunmaktadır.

Çizelge 4.32 : Mermer atıklı örneklerin ısı iletkenlik değerleri.

Örnek No	Isıl İletkenlik Değeri (W/mK)					
	A	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
1	0,1090	0,1320	0,1130	0,1090	0,1200	0,1030
2	0,1080	0,1310	0,1330	0,1180	0,1150	0,1010
Ort.	0,1085±0,0007	0,1315±0,0007	0,1230±0,014	0,1135±0,006	0,1135±0,003	0,1020±0,001
Değişim (%)		21,75	13,88	5,09	8,79	-5,55

Çizelge 4.32 de verilen mermer atık katkılı gaz betonların ısı iletkenlik değerleri incelendiğinde en yüksek değerin MA1 serisinde 0,1315 W/mK değeri ile, en düşük MA5 serisinde 0,1020 W/mK değeri ile elde edildiği görülmektedir. Serilerde atık oranı arttıkça ısı iletkenlik değeri azalma eğilimi sergilemiştir. Mermer atık kullanılan örneklerin kontrol numunesi (A) ile yapılan kıyaslamalarında %10, %20, %30, %40 atık oranlı serilerde ısı

iletkenlik değeri kontrol numunesinin (A) üzerinde iken, %50 atık oranlı seride ısı iletkenlik değeri, kontrol numunesinin (A) değerine göre %5,55 oranında düşüş göstermiştir.

Çizelge 4.33 : Seramik atıklı örneklerin ısı iletkenlik değerleri.

Örnek No	Isıl İletkenlik Değeri (W/mK)					
	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
1	0,1090	0,1160	0,1090	0,1270	0,1330	0,1450
2	0,1080	0,1430	0,0984	0,1420	0,1560	0,1500
Ort.	0,1085±0,0007	0,1295±0,019	0,1037±0,007	0,1345±0,01	0,1445±0,016	0,1475±0,003
Değişim (%)		19,91	-3,98	24,53	33,79	36,57

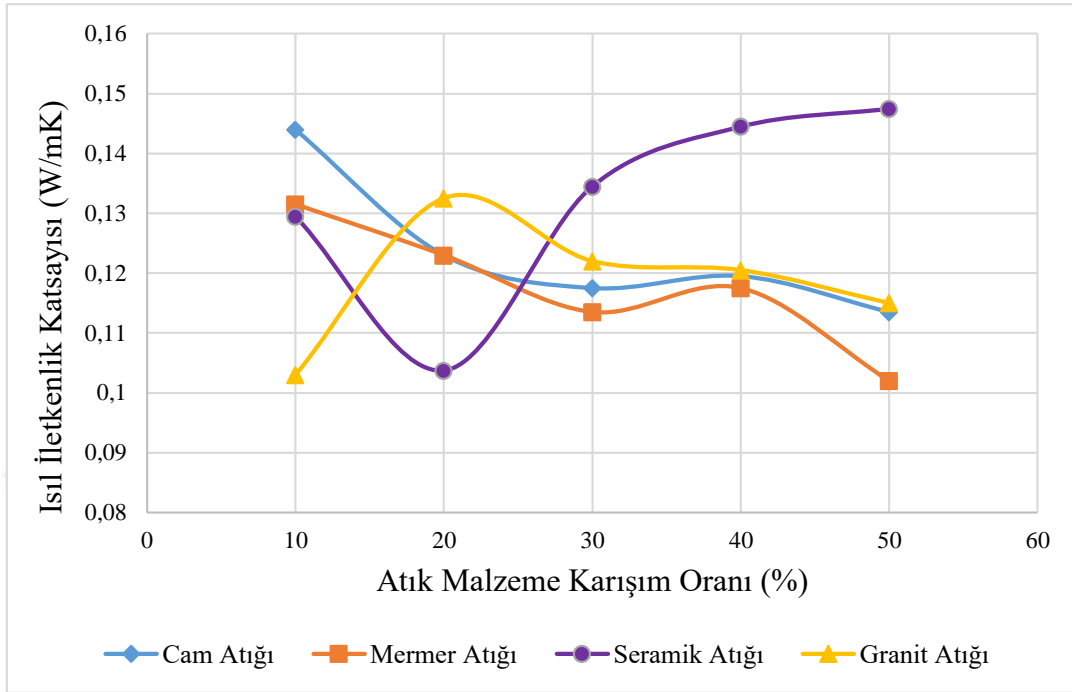
Seramik atık katkı ılı gaz beton örneklerinin ısı iletkenlik katsayılarının verildiği Çizelge 4.33 incelendiğinde en yüksek SA5 serisinde 0,1475 W/mK değerinin, en düşük SA2 serisinde 0,1037 W/mK değerinin elde edildiği görülmektedir. Kontrol numunesinin (A) ısı iletkenlik değerine göre yapılan kıyaslamada sadece SA2 serisinde %3,98 lik bir azalmanın geliştiği diğer serilerde kontrol numunesine (A) göre daha yüksek ısı iletkenlik değerlerinin elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.34 : Granit atıklı örneklerin ısı iletkenlik değerleri.

Örnek No	Isıl İletkenlik Değeri (W/mK)					
	A	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5
1	0,1090	0,1050	0,1290	0,1220	0,1200	0,1160
2	0,1080	0,1010	0,1360	0,1220	0,1210	0,1140
Ort.	0,1085±0,0007	0,1030±0,002	0,1325±0,004	0,1220±0	0,1205±0,0007	0,1150±0,001
Değişim (%)		-4,62	22,68	12,96	11,57	6,48

Çizelge 4.34 de yer alan granit atıklı gaz beton örneklerinin ısı iletkenlik değerleri incelendiğinde 0,1030 W/mK değeri ile GA1 serisinin, 0,1325 W/mK değeri ile GA2 serisinin en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Kontrol numunesi (A) ile yapılan

kıyaslamada granit atık katkısının sadece %10 değerinde iken ısı iletkenlik değerini %4,62 oranında azalttığı, diğer katkı oranlarında ısı iletkenliği arttırdığı görülmektedir.



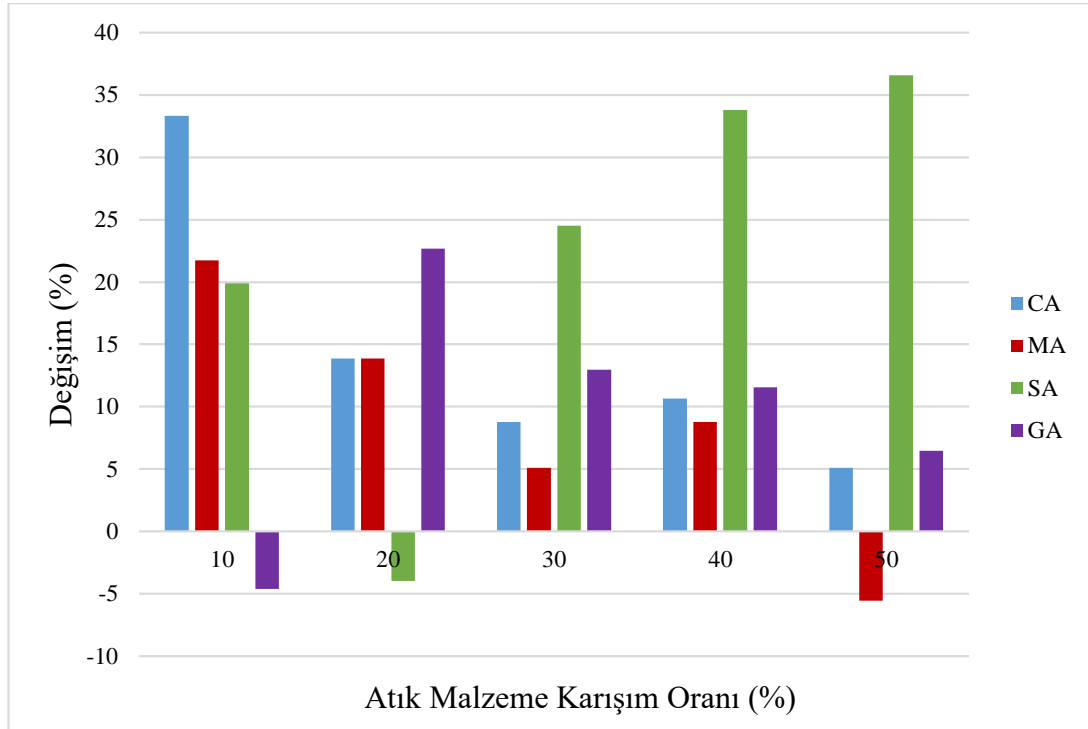
şekil 4.27 : Isıl iletkenlik-atık malzeme karışım oranı ilişkisi.

Çizelge 4.31-4.34 ve şekil 4.27 de belirtilen ısı iletkenlik değerleri ile birim hacim ağırlık değerleri arasında doğrusal bir ilişki belirlenmiştir. Gaz beton numunelerin ısı iletkenlik değerleri 0,102 W/mK ile 0,147 W/mK arasında değişmektedir. Örneklerin birim hacim ağırlık değerleri arttıka ısı iletkenlik değerlerinde de artış gerçekleşmiştir. şekil 4.27 de en yüksek ısı iletkenlik değeri %50 cam atık oranlı SA5, en düşük ısı iletkenlik değeri ise %50 mermer atık oranlı MA5 serisine aittir.

Çizelge 4.31-4.34 ve şekil 4.27 incelendiğinde cam, mermer, seramik, granit atıklarının değişik oranlarda kullanılmasıyla üretilen gaz beton numunelerin ısı iletkenlik değerleri kıyaslandığında, seramik atık kullanılan serilerde daha yüksek ısı iletkenlik değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu seriyi granit atıkları, daha sonrada cam atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serileri takip etmektedir. En düşük ısı iletkenlik değeri mermer atıkları kullanılarak üretilen gaz beton serilerinde elde edilmiştir.

En yüksek ısı iletkenlik değerlerinin elde edildiği seramik atık kullanılarak üretilen gaz betonların bünyelerinde atık oranı %30, %40 ve %50 da arttığı, %20 da ısı iletkenlik değerlerinin azaldığı şekil 4.27 ve Çizelge 4.31-4.34 den anlaşılmaktadır.

Isıl iletkenliğin atık miktarına göre yüzdesel değişimi Şekil 4.28 de verilmiştir.



Şekil 4.28: Isıl iletkenliğin atık miktarına göre yüzdesel değişimi.

Şekil 4.28 de %50 oranında mermer atığının kullanıldığı serinin ısıl iletkenlik değerini, kontrol numunesinin (A) ısıl iletkenlik değerine göre %5,55 azamıştır. En yüksek ısıl iletkenlik değerinin elde edildiği SA5 serisinde ısıl iletkenlik değeri, kontrol numunesinin (A) ısıl iletkenlik değerine göre %36,57 artış göstermiştir. Çizelge 2.4 de verilen gaz betonun ısıl iletkenlik değerleri ile uyumlu olduğu gürmektedir.

4.4 İstatistiksel Bulgular

4.4.1 Korelasyon analiz sonuçları

Korelasyon ile iki veya daha fazla deđiřken arasındaki iliřki incelenmektedir. Pearson korelasyon katsayısı (r), iki sűrekli deđiřken arasındaki dođrusal iliřkinin yűnűnű ve derecesinin ۆlçűlmesinde kullanılmakta ve -1 ve +1 arasında deđerler almaktadır. Pearson korelasyon katsayısının yorumu Őizelge 4.35 de verilmiřtir [50,109].

Çizelge 4.35 : Pearson korelasyon katsayısının yorumu.

Pearson Korelasyon Katsayısı (r)	İlişki
0,00-0,25	Çok Zayıf
0,26-0,49	Zayıf
0,50-0,69	Orta
0,70-0,89	Yüksek
0,90-1,00	Çok Yüksek

Bu çalışmanın istatistiksel analizinde bütün deneylerin uygulandığı toplam 41 örnek kullanılmıştır. Öncelikle değişkenler arasındaki doğrusal ilişki Pearson korelasyon katsayısı kullanılarak araştırılmıştır. Pearson korelasyon analizi sonuçları Çizelge 4.36 da belirtilmiştir.

Çizelge 4.36 : Pearson korelasyon analizi sonuçları.

Değişken		Basınç Dayanımı	Porozite	Birim Hacim Ağırlık	Ultrasonik Dalga Hızı	Su Emme	Isıl İletkenlik	Atık Oranı
Basınç Dayanımı	Korelasyon	1	-0,344*	-0,096	0,774*	-0,176	0,472*	-0,506*
	Sig.		0,028	0,550	0,000	0,270	0,002	0,001
Porozite	Korelasyon		1	-0,525*	-0,322*	0,907*	-0,389*	-0,167
	Sig.			0,000	0,040	0,000	0,012	0,296
Birim Hacim Ağırlık	Korelasyon			1	0,064	-0,826*	0,356*	0,157
	Sig.				0,691	0,000	0,022	0,327
Ultrasonik Dalga Hızı	Korelasyon				1	-0,225	0,513*	-0,250
	Sig.					0,158	0,001	0,114
Su Emme	Korelasyon					1	-0,406*	-0,168
	Sig.						0,009	0,293
Isıl İletkenlik	Korelasyon						1	-0,042
	Sig.							0,795
Atık Oranı	Korelasyon							1
	Sig.							

Not: * Korelasyon 0,05 düzeyinde anlamlıdır.

Çizelge 4.36 ın anlamlılık (Sig.) sütunundaki değerlerin 0,05 den küçük olması hesaplanan korelasyon katsayısının istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.36

incelendiğinde basınç dayanımı ile porozite arasında ters yönlü zayıf bir ilişki (-0,344), ultrasonik dalga hızı arasında doğru yönlü yüksek ilişki (0,774), ısı iletkenlik arasında doğru yönlü zayıf ilişki (0,472), atık oranı arasında ters yönlü orta dereceli ilişki (-0,506) olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Porozite ile birim hacim ağırlık arasında ters yönlü orta dereceli ilişki (-0,525), ultrasonik dalga hızı arasında ters yönlü zayıf ilişki (-0,322), su emme arasında doğru yönlü çok yüksek ilişki (0,907), ısı iletkenlik değişkenleri arasında ters yönlü zayıf ilişki (-0,389) olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Birim hacim ağırlık ile su emme arasında ters yönlü yüksek ilişki (-0,826), ısı iletkenlik arasında doğru yönlü zayıf ilişki (0,356) olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ultrasonik dalga hızı ile ısı iletkenlik arasında doğru yönlü orta dereceli ilişki (0,513), su emme ve ısı iletkenlik değişkenleri arasında ters yönlü zayıf ilişki (-0,406) tespit edilmiştir.

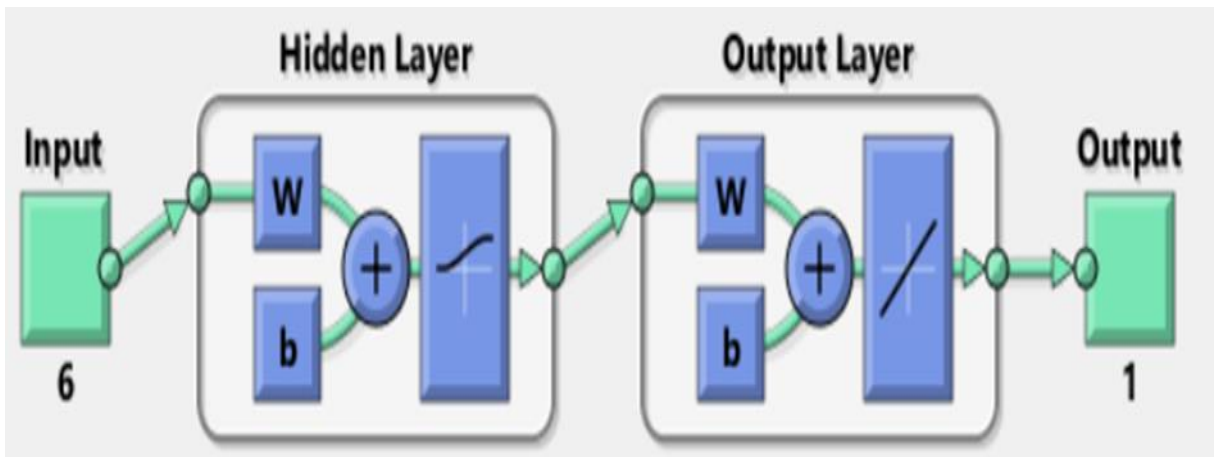
4.4.2 Yapay sinir ağıları analiz sonuçları

Korelasyon analizinden sonra YSA yöntemi kullanılarak basınç dayanımı tahmini yapılmıştır. Bunun için porozite, birim hacim ağırlık, ultrasonik dalga hızı, su emme, ısı iletkenlik ve atık oranı olmak üzere 6 girdi değişkeni kullanılmıştır. YSA modelleri için kullanılan veri seti eğitim ve test veri seti olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Çalışmada 31 gözlem eğitim verisi, 10 gözlem ise test verisi grubunda yer almaktadır ve bu veriler rastgele seçilmiştir. YSA modellerinde gizli katman aktivasyon fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant ve sigmoid, çıktı katmanı aktivasyon fonksiyonu olarak ise doğrusal fonksiyon kullanılmıştır. Aşırı küçük ve aşırı büyük değerlerin ağı yanlış yönlendirme olasılığını ortadan kaldırmak için girdi setleri [0 1] aralığında normleştirilmiştir. YSA modelleri, 1 girdi katmanı, 1 gizli katman ve 1 çıktı katmanı olacak şekilde oluşturulmuş, yüksek modelleme yeteneği ve etkin yakınsama tekniğinden dolayı Levenberg-Marquardt öğrenme algoritması ile eğitilmiştir. Tek gizli katmanlı ağlarda gizli katman nöron sayısına ilişkin önerilerden girdi katman nöron sayısı n olmak üzere; n , $2n+1$ ve $2n$ olacak şekilde gizli katman nöron sayıları belirlenmiştir [110-112]. Bu öneriler çerçevesinde çalışmada 6 girdi değişkeni (bağımsız değişken) olduğundan gizli katman nöron sayıları 6, 12 ve 13 olarak belirlenmiştir. En iyi mimariyi elde edebilmek için kurulan YSA modelleri Çizelge 4.37 de gösterilmiştir.

Çizelge 4.37 : YSA modellerinin tahmin performansları.

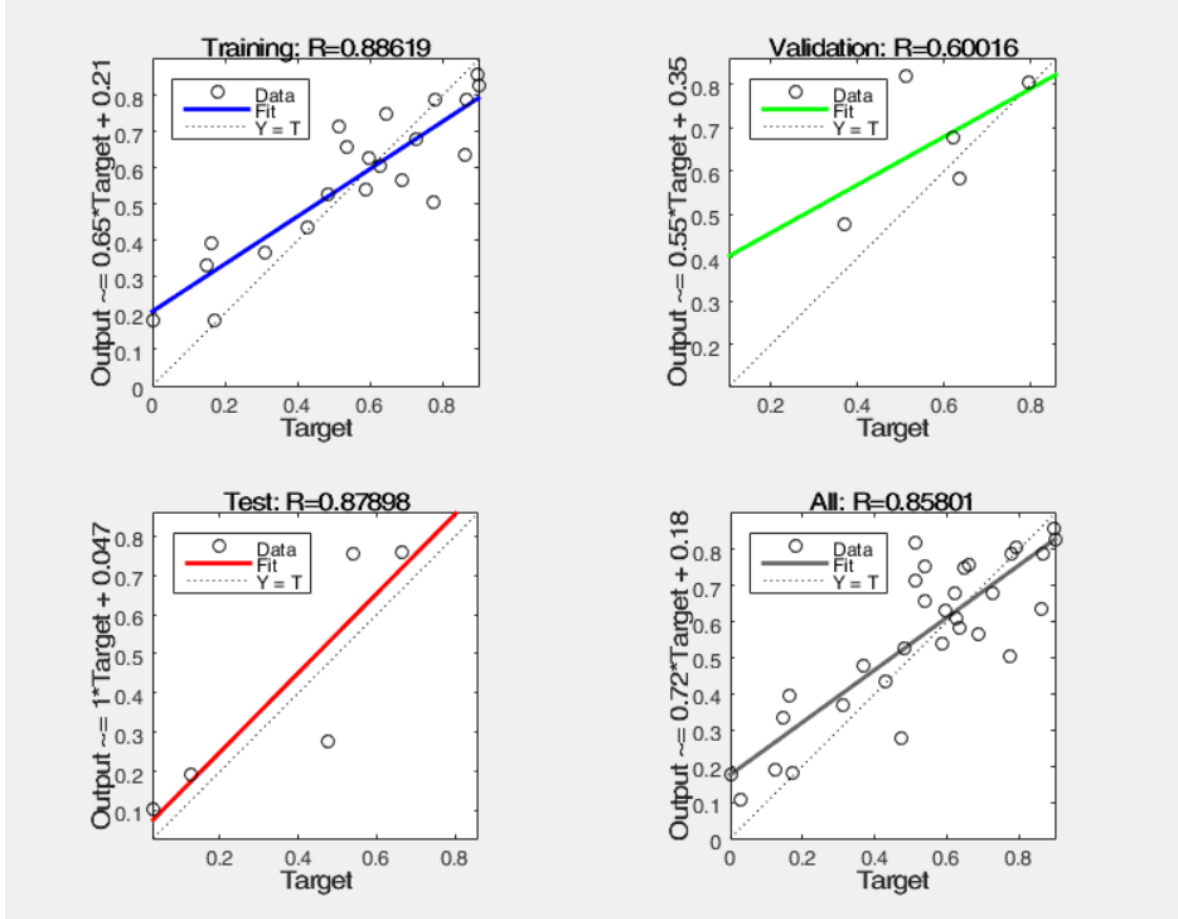
Modeller	Gizli Katman Nöron Sayısı	Gizli Katman Aktivasyon Fonksiyonu	Çıktı Katman Aktivasyon Fonksiyonu	MAPE	MSE
Model 1	6	Sigmoid	Doğrusal Fonksiyon	%14,14	0,047
Model 2	6	Hiperbolik Tanjant	Doğrusal Fonksiyon	%22,64	0,126
Model 3	12	Sigmoid	Doğrusal Fonksiyon	%70,20	0,446
Model 4	12	Hiperbolik Tanjant	Doğrusal Fonksiyon	%31,10	0,121
Model 5	13	Sigmoid	Doğrusal Fonksiyon	%21,30	0,213
Model 6	13	Hiperbolik Tanjant	Doğrusal Fonksiyon	%17,65	0,059

Çizelge 4.38 de test işlemi sonucunda elde edilen tahmin değerleri, gerçek değerlerle karşılaştırılarak Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percent Error-MAPE) ve Hata Kareler Ortalaması (Mean Square Error-MSE) değerleri hesaplanmış ve farklı mimarilere sahip YSA modellerinin tahmin performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, gizli katman aktivasyon fonksiyonu sigmoid, çıktı katman aktivasyon fonksiyonu doğrusal ve gizli katman nöron sayısı 6 olan YSA modelinin en iyi performansa sahip model olduğu belirlenmiştir. Bu modele ait MAPE değeri %14,14 MSE değer ise 0,047 olarak elde edilmiştir. Bu bulgu ile Model 1'in kullanılan modeller içerisinde en düşük hata düzeyine sahip model olduğu görülmüştür. Model 1'in ağ yapısı Şekil 4.29 da verilmiştir.



Şekil 4.29 : Model 1'in ağ yapısı.

Şekil 4.30 da ise eğitim, doğrulama ve test verileri için hedeflerin çıktılara göre doğrusal regresyon grafikleri verilmiştir. Aşın tüm verileri dikkate alındığında R değerinin 0,85 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.30 : YSA eğitim regresyonu.

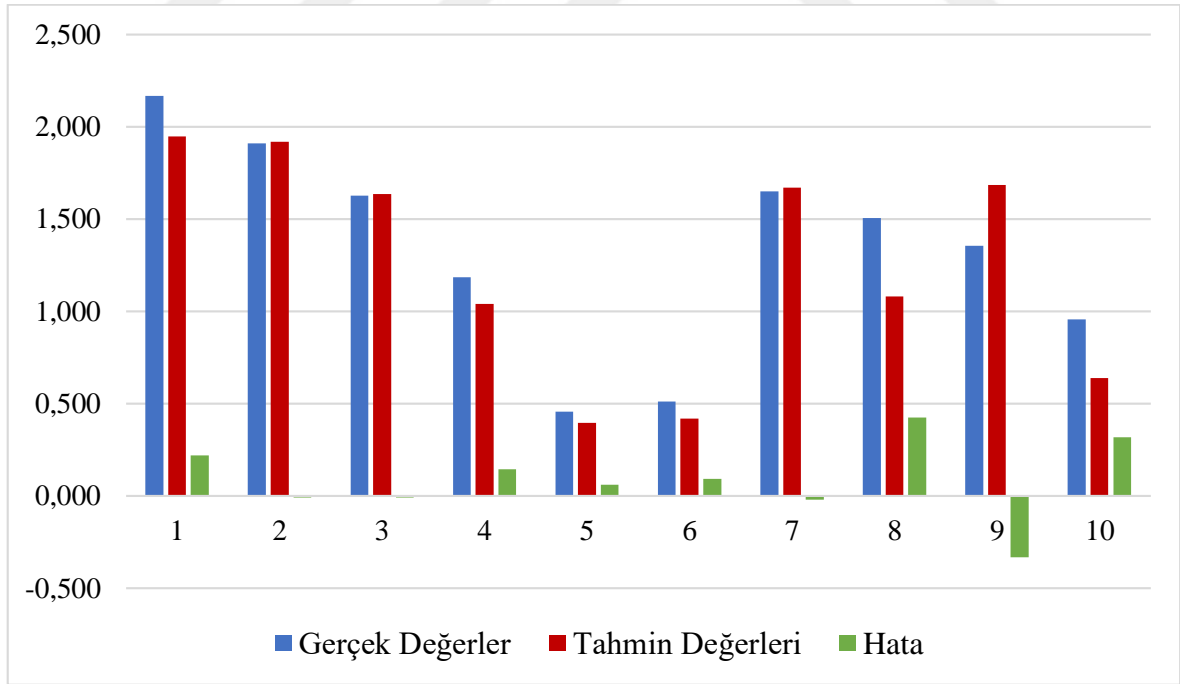
Lewis (1982), MAPE değeri %10'un altında hesaplanan modelleri "çok iyi", %10 ile %20 arasında hesaplanan modelleri "iyi", %20 ile %50 arasında hesaplanan modelleri "kabul edilebilir" %50'nin üzerinde hesaplanan modelleri ise "yanlış ve hatalı" olarak sınıflandırmıştır. Witt ve Witt (1992) ise MAPE değerleri %10'un altında hesaplanan tahmin modellerini "yüksek doğruluk" derecesine sahip modeller, %10 ile %20 arasında hesaplanan tahmin modellerini ise "doğru" modeller olarak sınıflamıştır [113,114].

Bu sınıflamalar göz önüne alındığında, en iyi performansa sahip YSA modeli olan Model 1'in "iyi" ve "doğruluk" derecesine sahip model olduğu söylenebilir. Test verisinde yer alan basınç dayanımı değerleri, Model 1 kullanılarak tahmin edilen değerler ve elde edilen hata değerleri Çizelge 4.38 te ve Şekil 4.31 ile verilmiştir.

Çizelge 4.38 : Basınç dayanımının gerçek ve tahmin değerleri ile elde edilen hatalar.

Gerçek Değer	Tahmin	Hata
2,168	1,947	0,221
1,911	1,919	-0,008
1,627	1,634	-0,007
1,185	1,040	0,145
0,456	0,397	0,059
0,512	0,420	0,092
1,649	1,670	-0,021
1,505	1,081	0,424
1,354	1,686	-0,332
0,956	0,639	0,317

Çizelge 4.14 ve Şekil 4.31 incelendiğinde tahmin sonuçlarının gerçek değerlere oldukça yakın olduğu elde edilen tahmin performanslarının yüksek kalitede olduğu ifade edilebilir. Elde edilen sonuçlar YSA yönteminin basınç dayanımı tahmininde kullanılabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.31 : Basınç dayanımının gerçek ve tahmin değerleri ile elde edilen hatalar.

Kullanılan ağın parametreleri izelge 4.39 da verilmiştir.

Çizelge 4.39 : En iyi performansa sahip modelin ağ parametreleri.

renme Algoritması	Geri Yayılım Algoritması
renme Kuralı	Momentum
Girdi Katmanı Nöron Sayısı	6
Gizli Katman Sayısı	1
Gizli Katman Nöron Sayısı	6
ıktı Katmanı Nöron Sayısı	1
Gizli Katman Transfer Fonksiyonu	Sigmoid
ıktı Katmanı Transfer Fonksiyonu	Doğrusal Fonksiyon
Geri Yayılım Ağının Eğitim Fonksiyonu	Levenberg-Marquardt (Trainlm)
Kullanılan lekleme Yöntemi	Normalleştirme

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ticari gaz beton üretiminde öğütülmüş kuvars kumu, kuvarsit kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında kuvarsit, belirli oranlarda cam, mermer, seramik, granit atığı ile yer değiştirilerek numuneler üretilmiştir. Düşük buhar basıncında elde edilen ürünlerin özellikleri araştırılmıştır.

Endüstriyel ve madensel atık olarak açığa çıkan çevresel kirliliğe neden olan cam, mermer, seramik, granit atığı gaz beton üretiminde değerlendirilerek ekonomiye kazanç sağlamak amacıyla yapılan deneysel çalışmada bulunan sonuçlar şöyle özetlenebilir.

- 1- Ticari gaz beton üretiminde uygulanan yüksek otoklav basıncı (10-12 bar) ile yüksek sıcaklık (180-190 °C) yerine, düşük otoklav basıncı (2,3 bar) ile düşük sıcaklık (135 °C) uygulanarak gaz beton örnekler üretilmiştir. Bu sebeple basınç dayanımları ticari gaz beton ürünlerinden bir miktar düşük çıkmıştır. Düşük çıkmasının nedeni olarak tobermorit oluşumlarının, yüksek basınçlı kürde daha iyi gelişmesidir.
- 2- Kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde, üretilen gaz betonların kuvars ve kalsit minerallerinden oluştuğu, SEM görüntülerinde ise tobermorit yapısı görülmektedir. Gözeneklerin birbirinden bağımsız, küresele yakın biçimde oluştuğu, 0,1-50 mm aralığında gözenek boyutları olduğu gözlemlenmiştir.
- 3- Cam, seramik ve granit atığı içerisinde bulunan silis miktarı, mermer atığında bulunan silis miktarından fazla olduğu için, atık oranı arttıkça cam, seramik ve granit atık katkılı örneklerde silis miktarı çok az azalırken, mermer atık katkılı örneklerde önemli ölçüde azalmış, CaO miktarı artmıştır. Bu nedenle mermer atık katkılı gaz beton örneklerinin iskelet sistemi zayıflamış, bunun sonucu olarak dayanım azalmıştır.
- 4- Atık oranı artıkça birim hacim ağırlığı değerleri cam atık katkılı örneklerde azalırken, diğer atıklarda artış gerçekleşmiştir.
- 5- Atık oranı artıkça porozite değerleri cam ve mermer atık katkılı örneklerde artarken diğer atık katkılı örneklerde azalmıştır.
- 6- Atık oranı artıkça su emme değerleri cam atık katkılı örneklerde artarken, diğer atık katkılı örneklerde artış azalış şeklinde seyir göstermiştir.
- 7- Atık oranı artıkça kapiler su emme değerleri tüm atık katkılı örneklerde artmıştır.
- 8- Atık oranı artıkça nem içeriği değerleri mermer ve seramik atık katkılı örneklerde azalırken, diğer atık katkılı örneklerde artış gerçekleşmiştir.

- 9- Atık oranı artıkça ultrasonik dalga hızı değerleri mermer atık katkılı örneklerde azalırken, seramik atık katkılı örneklerde artış meydana gelmiş, cam ve seramik atık katkılı örneklerde artış azalış şeklinde dalgalı bir seyir göstermiştir.
- 10- Atık oranı artıkça ısı iletkenlik değerleri cam ve mermer atık katkılı örneklerde azalırken seramik ve granit atık katkılı örneklerde artmıştır.
- 11- Atıkların özgül ağırlıklarının birim hacim ağırlığı etkilediği düşünülmektedir. En yüksek özgül ağırlığa sahip olan seramik atık katkılı numunelerin birim hacim ağırlıkları, diğer atık katkılı numunelere göre daha yüksek çıkmıştır.
- 12- Atık katkılı serilerin ısı iletim katsayısı, ticari gaz betonun ısı iletim katsayısı değeriyle kıyaslandığında birbirleri ile benzerlik göstermektedir. Birim hacim ağırlık ve basınç dayanımlarına göre sınıflandırılan gaz betonlar ile üretilen atık katkılı numunelerin birim hacim ağırlık ortalamalarına bakılırsa daha düşük birim hacim ağırlıklı numuneler elde etmek için su ve/veya Al tozu miktarı artırılarak üretim gerçekleştirilebilir. Basınç dayanım değerleri ortalamalarına bakıldığında ve ticari gaz beton ile kıyaslandığında dayanımı arttırmak için kür sıcaklığı ve basıncı yükseltmek gerektiği söylenebilir.
- 13- Gaz beton örneklerinde birim hacim ağırlığının en düşük olduğu değer $515,98 \text{ kg/m}^3$ ile %30 granit atık katkılı GA3 örneğinde, en yüksek değer $630,78 \text{ kg/m}^3$ ile birim hacim ağırlığının %40 seramik atık katkılı SA4 örneğinde elde edilmiştir. Gaz beton örneklerin birim hacim ağırlıkları, ticari gaz betonun birim hacim ağırlıklarıyla uyumludur.
- 14- Üretilen gaz beton numunelerin en düşük porozite değeri %35,01 ile %40 seramik atık katkılı SA4 örneğine, en yüksek porozite değeri %46,33 ile %30 granit atık katkılı GA3 örneğine aittir.
- 15- Deney numunelerin en düşük su emme değeri %55,94 ile %40 seramik atık katkılı SA4 örneğine, en yüksek su emme değeri %91,21 ile %30 granit atık katkılı GA3 örneği olduğu belirlenmiştir.
- 16- En yüksek kapiler su emme değeri $92,723 \text{ [g/(m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})]$ ile %30 mermer atık oranlı MA3 numunesine, en düşük kapiler su emme değeri $60,022 \text{ [g/(m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})]$ ile %30 seramik atık oranlı SA3 numunesine aittir.
- 17- En yüksek nem içeriği değeri %33,91 ile %50 seramik atık oranlı SA5 örneğine, en düşük nem içeriği değeri ise %2,10 ile %50 mermer atık oranlı MA5 örneğine aittir. En düşük nem içeriği değerlerinin mermer atıklı gaz beton örneklerde olduğu görülmüştür. En yüksek nem içerikleri, seramik atıklı örneklerde belirlenmiştir. Seramik atık içerisinde bulunan pişmiş kilin adsorplama özelliği nedeniyle, karışım içerisinde bulunan suyu

tuttuğu düşünölmektedir. Kontrol numunesi (A) ile karşılaştırıldığında atık katkısı ile nem içeriklerinin arttığı gözlenmiştir.

- 18- En yüksek basınç dayanım değeri 1,99 MPa ile %10 cam atık oranlı CA1 örneğine, en düşük basınç dayanım değeri 0,42 MPa ile %50 mermer atık oranlı MA5 örneğine aittir. En düşük basınç dayanım değerlerinin mermer atıklı gaz beton örneklerde olduğu görölmüştür. Atıklardaki silis miktarı azaldıkça, basınç dayanımı düşmüştür. Basınç dayanım değerleri incelendiğinde, cam atığı ile üretilen serilerin dayanım değerleri, diğer serilere göre daha yüksek bulunmuştur. Basınç dayanımında en büyük düşüş mermer atığı ve granit atığı ile üretilen gaz beton numunelerinde elde edilmiştir. Tüm atık katkılı gaz beton örneklerinde, atık oranı artıkça basınç dayanım değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Mermer atık katkılı örneklerde en düşük basınç dayanımı elde edilmesinin nedeni atık içerisindeki silis miktarının düşük olmasından kaynaklanmıştır.
- 19- En düşük ultrasonik dalga hızı değerinin 923,46 m/s ile %50 mermer atık katkılı MA5 numunesine, en yüksek ultrasonik dalga hızı değerinin 1575,93 m/s %50 seramik atık katkılı SA5 numunesine ait olduğu belirlenmiştir.
- 20- En yüksek ısı iletkenlik değeri 0,147 W/mK ile %50 cam atık oranlı SA5 örneğine, en düşük ısı iletkenlik değeri 0,102 W/mK ile %50 mermer atık oranlı MA5 örneğine aittir.
- 21- Mermer katkılı atıkların kapiler su emme değerlerinin yüksek, basınç dayanımı, ultrasonik dalga hızı ve ısı iletkenlik değerinin düşük olması yapısında kılcal çatlaklar olabileceğini göstermektedir.
- 22- Cam atığının içerisindeki silisin amorf yapıda olması ve daha iyi puzolanik özelliklere sahip olması ile basınç dayanımının yüksek çıktığı düşünölmektedir.
- 23- Gaz beton ürünlerin genellikle yoğunluk ve basınç dayanımı doğru orantılıdır. Birim hacim ağırlığı azaldıkça, basınç dayanımı değerleri düşmektedir. Örneklerin basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları arasında kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır. Korelasyon analizinde bu ilişki görölmektedir.
- 24- Atık katkı türü ve oranının gaz beton örneklerinin ısı iletkenlik değerleri üzerinde etkisinin çok olmadığı, değerlerin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.
- 25- Korelasyon analizi sonucunda, basınç dayanımı ile porozite arasında ters yönlü zayıf bir ilişki (-0,344), ultrasonik dalga hızı ile arasında doğru yönlü yüksek ilişki (0,774), ısı iletkenlik ile arasında doğru yönlü zayıf ilişki (0,472), atık oranı ile arasında ters yönlü orta dereceli ilişki (-0,506) olduğu sonucuna varılmıştır.

- 26- Porozite ile birim hacim ağırlık arasında ters yönlü orta dereceli ilişki (-0,525), ultrasonik dalga hızı ile arasında ters yönlü zayıf ilişki (-0,322), su emme ile arasında doğru yönlü çok yüksek ilişki (0,907), ısı iletkenlik ile arasında ters yönlü zayıf ilişki (-0,389) olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Birim hacim ağırlık ile su emme arasında ters yönlü yüksek ilişki (-0,826), ısı iletkenlik ile arasında doğru yönlü zayıf ilişki (0,356) olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ultrasonik dalga hızı ile ısı iletkenlik arasında doğru yönlü orta dereceli ilişki (0,513), su emme ve ısı iletkenlik değişkenleri arasında ters yönlü zayıf ilişki (-0,406) belirlenmiştir.
- 27- YSA sonuçlarına göre tahmin sonuçlarının gerçek değerlere oldukça yakın olduğu, elde edilen tahmin performanslarının yüksek kalitede olduğu söylenebilir. Elde edilen sonuçlar ile YSA yöntemi, basınç dayanımı tahmininde kullanılabilecek başarılı bir yöntemdir.
- 28- Elde edilen sonuçlara göre cam tozu gibi silis oranı yüksek atıkların gaz beton üretiminde kullanılabileceği söylenebilir. Çünkü kontrol (A) numunesi ile karşılaştırıldığında bütün cam atık katkılı serilerde daha yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Diğer atıklara göre silis miktarı daha fazla olduğundan gaz betonun iskelet yapısının daha sağlam olduğu düşünülmektedir.
- 29- Ülkemizde endüstriyel atık olarak adlandırılan ve depolama masraflarının yanında büyük çevre kirliliğine yol açan bu malzemelerin, gaz beton üretiminde kullanılması ile doğal ham madde korunumu sağlanmış, ayrıca çevreye ve kamuya verilen zarar da azaltılmış olacaktır.
- 30- Ülkemizde ve dünyada sorun olarak karşımıza çıkan, endüstriyel ve madensel atık olarak adlandırılan ve depolama masraflarının yanında büyük çevre kirliliğine yol açan bu malzemelerin, gaz beton üretiminde kullanılması ile hem atıklar bertaraf edilmiş, hem de hammadde kaynağı sağlanmış ve çevreye ve kamuya verilen zarar da azaltılmış olacaktır. Atıkların geri dönüştürülmesiyle birlikte, hammadde kullanımında tasarruf sağlanacak ve ekolojik denge korunacaktır.
- 31- Çevre bilincine sahip insanların, kurum ve kuruluşların tüm faaliyetlerinde çevreci olmak teşvik edilmeli, atıkların çevreye, sağlığa ve ekonomiye olan zararlarının minimuma indirilmesi konusunda yapılacak olan çalışmalara katkı sağlanmalıdır. Çevre duyarlılığını artırıcı, çevreci ürün stratejisini tüm işletmelere yayan bir anlayış ortaya koymak gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Savaş M., Demir İ., Güzelküçük S., Şengül Ç.G. ve Yaprak H.** (2014). Sepiyolit İkame Edilmiş Gaz betonun Isıl ve Basınç Dayanım Özellikleri, *Politeknik Dergisi*, 17:1 (Özel Sayı), 43-47.
- [2] **Chen Y., Chang J., Lai Y. ve Chou M.** (2017). A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions, *Construction and Building Materials*, 153, 622-629.
- [3] **Heriyanto, Pahlevani F., Sahajwalla V.** (2018). From waste glass to building materials- An innovative sustainable solution for waste glass, *Journal of Cleaner Production*, 191, 192-206.
- [4] **Pehlivan E., Yazıcı M. ve Güner G.** (2014). Endüstriyel Katı Atıklar ve Geri Kazanım, 2. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2014), Karabük, Türkiye: June 18-20.
- [5] **Öztürk M.** (2018). Mermer Kesiminden Kaynaklanan Çevre Kirliliği ve Önlemler, Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- [6] **Liu Y., Leong B. S., Hu Z. ve Yang E.** (2017). Autoclaved aerated concrete incorporating waste aluminum dust as foaming agent, *Construction and Building Materials*, 148, 140-147.
- [7] **Taşdemir C.** (2003). Hafif Betonların Isı Yalıtım ve Taşıyıcılık Özellikleri, *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 427, 57-61.
- [8] **Güner M.S.** (2012). *Malzeme Bilimi- Yapı Malzemesi ve Beton Teknolojisi*. İstanbul: Aktif Yayınevi.
- [9] **Ünal O. ve Uygunoğlu T.** (2007). Diatomitin Hafif Beton Üretiminde Kullanılması, *İMO Teknik Dergi*, 266, 4025-4034.
- [10] **Karahan O., Tekin Y., Atış C. D. İlkentapar S. ve Uğur M.** (2015). EPS Şap Betonunun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri, *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, (pp.229-232). Ankara, Türkiye: May. 28-30.

- [11] **Wittmann F. H.** (1992). Advances in Autoclaved Aerated Concrete, *Proceedings of the 3rd Rilem Internanonal Symposium on Autoclaved Aerated Concrete*, (pp.2-8). Switzerland: Oct. 14-16.
- [12] **TS EN 771-4:2011+A1** (2011). *Kagir Birimler-Özellikler Bölüm 4: Gaz Beton Kagir Birimler*, Türk Standartları Enstitüsü.
- [13] **Url-1** < <http://www.akg-gazbeton.com/gazbeton-nedir> >, date retrieved 03.07.2021.
- [14] **Özgenç İ. ve Sarısözen B.** (1999). Türkiye Gazbeton Üretiminde Perlit Kullanılabilir mi? 3. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, (pp.81-86). İzmir, Türkiye: Ekim 14-15.
- [15] **Url-2** < <https://www.pngegg.com/tr/png-ovvdw> >, date retrieved 03.07.2021.
- [16] **Subash M.C.G., Satyannarayana V.S.V. ve Srinivas J.** (2016). Aerated Autoclaved Concrete (AAC) Blocks: A Revolution Building Material in construction Industry, *International Journal of Science Technology and Management*, 5, 167-173.
- [17] **Holt E. ve Raivio P.** (2005). Use Of Gasification Residues In Aerated Autoclaved Concrete, *Cement and Concrete Research*, 3, 796-802.
- [18] **Borhan B.** (1987). *Ytong El Kitabı-1*. İstanbul, Ytong Teknik Yayınları.
- [19] **Kunchariyakun K., Asavapisit S. ve Sombatsompop K.** (2015). Properties of autoclaved aerated concrete incorporating rice husk ash as partial replacement for fine aggregate, *Cement&Concrete Composites*, 55, 11-16.
- [20] **Güçlüer K.** (2019). *Zeolit Metakaolin ve Yüksek Fırın Cürufunun Birlikte Kullanımının Gazbeton Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*, (Doktora Tezi). Tez Merkezi (Tez No. 544524).
- [21] **Öz C. ve Özer Ö.** (2019). Seramik Arkeometrisinde Spektroskopik Yöntemlerin Uygulanması ve Yorumlanması: XRF, XRD, *Seramik Araştırmaları Dergisi*, Sayı 1, 136-153.
- [22] **Url-3** < <https://www.pngwing.com/tr/free-png-tvowy> >, date retrieved 03.07.2021.
- [23] **Karakaya Ç.M.** (2006). *Kil minerallerinin özellikleri ve tanımlanma yöntemleri*. Ankara: Bizim Büro Basımevi.

- [24] **Özdemir, E.** (2020). Çevresel Faktörlerin Etkisiyle Kayaçların Kırılma İndekslerinde Meydana Gelen Değişimlerin Belirlenmesi, (Doktora tezi). Tez Merkezi (Tez No. 629831).
- [25] **Narayanan N. ve Ramamurthy K.** (2000). Structure and Properties of Aerated Concrete: A Review, *Cement & Concrete Composites*, 22, 321-329.
- [26] **Kömürlü R. ve Önel H.** (2007). Gazbeton Yapı Ürünlerinin Konutlarda Kullanımı, *YTÜ Mimarlık Fakültesi E- Dergisi*, 2: 3, 145-158.
- [27] **Erdoğan T. Y.** (2003). *Beton*, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık.
- [28] **Alyamaç K.E. ve İnce R.** (2007). Geleneksel Betonda Nem Oranı- Kırılma Parametreleri İlişkisinin Belirlenmesi, 8. *Uluslararası Kırılma Konferansı*, (pp.635-643). İstanbul, Türkiye: Kasım 7-9.
- [29] **TS EN 772-10** (2000). *Kagir birimler-Deney metotları-Bölüm 10: Kireç kumtaşı ve gaz beton birimlerde rutubet muhtevası tayini*, Türk Standartları Enstitüsü.
- [30] **Koru M.** (2016). Açık hücreli yalıtım malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik katsayılarının ısı akış ölçer yöntemiyle belirlenmesi, *International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, (pp 333-339). Turkey: Afyon Kocatepe University, April 21-22.
- [31] **Kahraman S.** (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 38, 981-994.
- [32] **Khandelwal M. ve Ranjith P.G.** (2010). Correlating index properties of rocks with P-wave measurements, *Journal of Applied Geophysics*, 71, 1-5.
- [33] **Callister W. D. ve Rethwisch D. G.** (2013). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği* (Prof.Dr. K. Genel, Çev.), Ankara: Nobel Yayıncılık.
- [34] **Temur S.** (2007). *Endüstriyel Hammaddeler*, Konya: Çizgi Kitapevi.
- [35] **Kurt H. ve Arık F.** (2007). *Mineraloji*, Ankara: Nobel Yayıncılık.
- [36] **Madencilik Özel İhtisas Raporu.** (2001). Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayi Hammaddeleri III, (Kuars kumu- Kuarsit- Kuvars) <https://www.maden.org.tr/meslegimiz/oik625.pdf>

- [37] **Uysal M., Gündoğdu B. C. ve Sümer M.** (2012). Gazbetonun kuruma rötresine bağlayıcı malzeme miktarı değişiminin etkisi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28:4, 303-308.
- [38] **Domingo E. R.** (2008). *An Introduction to Autoclaved Aerated Concrete Including Design Requirements Using Strength Design*, (Master Thesis). <http://hdl.handle.net/2097/543>.
- [39] **Mostafa N.Y.** (2005). Influence of Air-Cooled Slag on Physicochemical Properties of Autoclaved Aerated Concrete, *Cement and Concrete Research*, 35, 1349-1357.
- [40] **Sinica M., Sezemanas G., Mikulskis D., Kligys M. ve Česnauskas V.** (2012). Investigation of sorption properties in crushed autoclaved aerated concrete waste, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 20, 67-75.
- [41] **Kurama H., Topcu I.B. ve Karakurt C.** (2009). Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 767-773.
- [42] **Walczaka P., Malolepszy J., Reben M., Szymański P. ve Rzepa K.** (2015). Utilization of waste glass in autoclaved aerated concrete, *Procedia Engineering*, 122, 302-309.
- [43] **Orhan E. ve Şahin M.** (2016). Öğütölmüş Atık Cam Tozu Katkılı Betonun Basınç Dayanımına Yüksek Sıcaklığın Etkisi, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5:1, 61-70.
- [44] **Tanyıldızı H. ve Coşkun A.** (2011). Elazığ yöresi vişne mermer tozu katkılı hafif betonun basınç ve ultrasonik ses geçirgenliği özelliğinin araştırılması, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27:2, 150-154.
- [45] **Yazıcıoğlu S. ve Kara C.** (2017). Betonda Atık Mermer Tozu Kullanımının Karbonatlaşmaya Etkisi, *Politeknik Dergisi*, 20:2, 369-376.
- [46] **Taş H.H., Çoban Ö. ve Topbaşı B.** (2013). Endüstriyel Demir Talaşı Atığının Betonun Bazı Mekanik Özelliklerine Etkisi, *SDU International Technologic Science*, 5:1, 1-11.

- [47] **Poyraz M. ve Yılmaz Z.** (2017). Seramik Karo Sektöründe Sürdürülebilirlik ve Geri Dönüşüm, *Anadolu Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi*, 258-260.
- [48] **Singh S., Nagar R. ve Agrawal V.** (2016). Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions, *Journal of Cleaner Production*, 127, 172-182.
- [49] **Çil B.** (2013). *İstatistik*, Ankara: Detay yayıncılık.
- [50] **Güriş S. ve Astar M.** (2014). *Bilimsel Araştırmalarda SPSS ile İstatistik*, İstanbul: DER Yayınları.
- [51] **Hamzaçebi C.** (2011). *Yapay Sinir Ağları*, Bursa: Ekin Yayınevi.
- [52] **Yılmaz A.** (2017). *Yapay zeka*, İstanbul: Kodlab Yayınevi.
- [53] **Demirel B. ve Ekici B.B.** (2008). Öğütülmüş Pomzanın Beton Basınç Dayanımının Etkisinin Yapay Sinir Ağı ile Belirlenmesi, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 3:1, 20-29.
- [54] **Topçu İ.B. ve Sarıdemir M.** (2008). Yüksek-Düşük Kireçli Uçucu Kül İçeren Betonların Basınç Dayanımının YSA ve BM Kullanarak Tahmini, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 21:1, 39-55.
- [55] **Siddique N. ve Adeli H.** (2013). *Computational Intelligence: Synergies of Fuzzy Logic, Neural Networks and Evolutionary Computing*, United States: John Wiley&Sons, Ltd.
- [56] **Başığit C., Akkaş A. K. ve Kurtarıcı M.N.** (2012). Betonların Radyasyon Zırh Kalınlıklarının Yapay Sinir Ağları ve Çoklu Regresyon Metotları ile Tahmini, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16:1, 77-81.
- [57] **He X. ve Xu S.** (2009). *Process Neural Networks Theory and Applications*, New York: Springer.
- [58] **Açıkgenç M., Alyamaç K.E. ve İnce R.** (2012). Mermer Tozu ile Üretilmiş Kendiliğinden Yerleşen Betonların Dayanım Özelliklerinin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Belirlenmesi, *SDU International Technologic Science*, 4:3, 72-79.

- [59] **Çakıroğlu M. A. ve Çimen O.** (2015). Geri Seken Malzeme ile Üretilmiş Parke Taşlarının Çekme Dayanımlarının Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Tahmin Edilmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19:2, 60-65.
- [60] **Doğan H. ve Şener F.** (2004). Hafif yapı malzemeleri (Ponza-perlit-ytong-gazbeton) kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik sonuç ve öneriler, *JMO Haber Bülteni*, 51-53.
- [61] **Jin H., Yao X., Fan L., Xuc X. ve Yu Z.** (2016). Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 589-602.
- [62] **Kadashevich I., Schneider H. ve Stoyan D.** (2005). Statistical modeling of the geometrical structure of the system of artificial air pores in autoclaved aerated concrete, *Cement and Concrete Research*, 35: 8, 1495-1502.
- [63] **Walczak P., Szymański P. ve Różycka A.** (2015). Autoclaved Aerated Concrete based on fly ash in density 350 kg/m^3 as an environmentally friendly material for energy - efficient constructions, *Procedia Engineering*, 122, 39-46.
- [64] **Yi S., Fan L., Fu J., Xu X. ve Yu Z.** (2016). Experimental determination of the water vapor diffusion coefficient of autoclaved aerated concrete (AAC) via a transient method: Effects of the porosity and temperature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 607-610.
- [65] **Cabrillac R., Fiorio B., Beaucour A., Dumontet H. ve Ortola S.** (2006). Experimental Study of the Mechanical Anisotropy of Aerated Concretes and of the Adjustment Parameters of the Introduced Porosity, *Construction and Building Materials*, 20, 286-295.
- [66] **Jerman M., Keppert M., Vy'borny' J. ve C'erny' R.** (2013). Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete, *Construction and Building Materials*, 41, 352-359.
- [67] **Isu N., Ishida H. ve Mitsuda T.** (1995). Influence of Quartz Particle Size on TheChemical And Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete Tobermorite Formation, *Cement and Concrete Research*, 25:2, 243-248.

- [68] **Matsui K., Kikuma J., Tsunashima M., Ishikawa T., Matsuno S., Ogawa A. ve Sato M.** (2011). In Situ Time-Resolved X-Ray Diffraction of Tobermorite Formation in Autoclaved Aerated Concrete: Influence of Silica Source Reactivity and Al Addition, *Cement and Concrete Research*, 41, 510-519.
- [69] **Hamad A.J.** (2014). *Materials, Production, Properties and Application of Aerated Lightweight Concrete: Review*, International Journal of Materials Science and Engineering, 2:2, 152-157.
- [70] **Gopalakrishnan S. ve Sowndhararajan N.** (2017). Study on Material and Mechanical Properties of Autoclave Aerated Concrete, *South Asian Journal of Engineering and Technology*, 3:7, 22-38.
- [71] **Narayanan N. ve Ramamurthy K.** (2000). Microstructural investigations on aerated concrete, *Cement and Concrete Research*, 30, 457-464.
- [72] **Evgeniya T.** (2016). Develop an Efficient Method for Improving Hydrophysical Properties of Aerated Concrete Using Industrial Waste, *Procedia Engineering*, 153, 761-765.
- [73] **Araujo E.G. ve Tenerio J.A.S.** (2005). Cellular Concrete with Addition of Aluminum Recycled Foil Powders, *Materials Science Forum*, 198-204.
- [74] **Huang X., Ni W., Cui W., Wang Z. ve Zhu L.** (2012). Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast, *Construction and Building Materials*, 27, 1-5.
- [75] **Güçlüer K., Ünal O., Demir İ. ve Başpınar M.S.** (2015). An Investigation of Steam Curing Pressure Effect on Pozzolan Additive Autoclaved Aerated Concrete *TEM Journal*, 4:1, 78-82.
- [76] **Günaydın O., Güçlüer K. ve Ünal O.** (2016). Adıyaman Atık Mermer Tozlarının Gaz Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12:1, 21-29.
- [77] **Abdullah K., Hussin M.W., Zakaria F., Muhamad R. ve Abdul Hamid Z.** (2006). Pofa: A Potential Partial Cement Replacement Material in Aerated Concrete, *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference (APSEC 2006)*. (pp.132-140), Kuala Lumpur: Malaysia, Sep. 5-6.

- [78] **Rózycka A. ve Pichór W.** (2016). Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete, *Construction and Building Materials*, 120, 65-71.
- [79] **Kunchariyakun K., Asavapisit S. ve Sombatsompop K.** (2015). Effect of Fine Al Containing Waste in Autoclaved-Aerated Concrete Incorporating Rice-Husk Ash, *J. Mater. Civ. Eng.*, 27(8): 04014220, 1-7.
- [80] **Gunasekaran M., Saranya G., Elamaran L., Sakthivel P. ve Suresh P.** (2016). Development of Light Weight Concrete by Using Autoclaved Aerated Concrete, *IJIRST- International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2:11, 518-522.
- [81] **Wu Q., Guang J., Li S., Wang S., Zou X., Zhu H. ve Zhang C.** (2018). Development of Autoclaved Aerated Concrete from Mechanically Activated Magnesium Rich Nickel Slag, *J. Mater. Civ. Eng.*, 30 (7), 1-8.
- [82] **Song Y., Guo C., Qian J. ve Ding T.** (2015). Effect of the Ca-to-Si ratio on the properties of autoclaved aerated concrete containing coal fly ash from circulating fluidized bed combustion boiler, *Construction and Building Materials*, 83, 136-142.
- [83] **Begum R., Habib A. ve Mostafa S.** (2014). Effects of Rice Husk Ash on the Non Autoclaved Aerated Concrete, *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 3:1, 116-121.
- [84] **Drochytka R., Zach J., Korjenic A. ve Hroudová J.** (2013). Improving the energy efficiency in building while reducing the waste using autoclaved aerated concrete made from power industry waste, *Energy and Buildings*, 58, 319-323.
- [85] **Lekūnaitė L., Laukaitis A., Klūgys M. ve Mikulskis D.** (2012). Investigations of Forming Mixture Parameters of Autoclaved Aerated Concrete with Nano additives, *Materials Science*, 18:3, 284-289.
- [86] **Cai L., Ma B., Li X., Lv Y., Liu Z. ve Jian S.** (2016). Mechanical and hydration characteristics of autoclaved aerated concrete (AAC) containing iron tailings: Effect of content and fineness, *Construction and Building Materials*, 128, 361-372.

- [87] **Pehlivanlı Z. O., Uzun I. ve Demir I.** (2015). Mechanical and microstructural features of autoclaved aerated concrete reinforced with autoclaved polypropylene, carbon, basalt and glass fiber, *Construction and Building Materials*, 96, 428-433.
- [88] **Melnyk A.Y., Poznyak O.R. ve Soltysik R.A.** (2013). Non-Autoclaved Aerated Concrete Produced Using Industrial Wastes, *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository*, 756, 161-166.
- [89] **Haoui L.S. ve Min P.J.** (2017). Potantial of Substituting Waste Glass in Aerated Light, *Procedia Engineering*, 171, 633-639.
- [90] **Wang C., Ni W., Zhang S., Wang S., Gai G. ve Wang W.** (2016). Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and iron ore tailing, *Construction and Building Materials*, 104, 109-115.
- [91] **Pedro R., Tubino R. M. C., Anversa J., Col D. D., Lermen R.T. ve Silva R.A.** (2017). Production of Aerated Foamed Concrete with Industrial Waste from the Gems and Jewels Sector of Rio Grande do Sul-Brazil, *Applied Sciences*, 7:985, 1-13.
- [92] **Ogrodnik P. ve Szulej J.** (2017). The impact of aeration of concrete based on ceramic aggregate, exposed to high temperatures on its strength parameters, *Construction and Building Materials*, 157, 909-916.
- [93] **Didamonya H., Amera A.A., Mohammed M.S. ve El-Hakima M.** (2019). Fabrication and properties of autoclaved aerated concrete containing agriculture and industrial solid wastes, *Journal of Building Engineering*, 22, 528-538.
- [94] **Wang Y., Huang J., Wang D., Liu Y., Zhao Z. ve Liu J.** (2020). Experimental study on hygrothermal characteristics of coral sand aggregate concrete and aerated concrete under different humidity and temperature conditions, *Construction and Building Materials*, 230, 1-17.
- [95] **Mermer N. K., Yılmaz M. S., Pişkin S.** (2016). Preparation of Gas Concrete Materials From Various Industrial Waste, *Sigma J Eng & Nat Sci*, 34:4, 545-553.
- [96] **Xu R., He T., Da Y., Liu Y., Li J., Chen C.** (2019). Utilizing wood fiber produced with wood waste to reinforce autoclaved aerated concrete, *Construction and Building Materials*, 208, 242-249.

- [97] **Hustavova J., Sebestova1 P., Meszarosova1 L., Cerny1 V. ve Drochytka R.** (2019). Usability of waste perlite in the technology of production of autoclaved aerated concrete, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 549, 1-8.
- [98] **Yıldız T., Yıldız S., Keleştemur O., Bölükbaş Y. ve Demirel B.** (2011). Yapay Sınır Ağları ile Atık Mermer Tozu ve Cam Lif Katkılı Betonların Yarmada Çekme Dayanımlarının Tahmini, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 6: 4, 1498-1508.
- [99] **TS EN 1097-7** (2009). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-Bölüm 7: Dolgunun tane yoğunluğu tayini-Piknometre yöntemi*, Türk Standartları Enstitüsü.
- [100] **TS EN 772-13** (2002). *Kağir birimler-Deney metotları-Bölüm 13: Kağir birimlerin net ve brüt kuru birim hacim kütlelerin tayini (doğal taş hariç)*, Türk Standartları Enstitüsü.
- [101] **TS EN 772-4** (2002). *Kağir birimler-Deney metotları- Bölüm 4: Tabii taş kağir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini*, Türk Standartları Enstitüsü.
- [102] **TS EN 772-11:2011** (2011). *Kâğir birimler-Deney metotları-Bölüm 11: Betondan, yapay ve doğal taştan yapılmış kâğir birimlerde kapiler su emme ve kil kâğir birimlerde ilk su emme hızının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü.
- [103] **TS EN 772-1+A1** (2015). *Kâğir birimler-Deney yöntemleri-Bölüm 1: Basınç dayanımının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü.
- [104] **TS EN 12504-4** (2012). *Beton deneyleri-Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü.
- [105] **TS EN 12664** (2009). *Yapı malzemeleri ve mamulleri-Isıl direncin, korumalı tablalı ısıtıcı ve ısı akı ölçerin kullanıldığı metotlarla tayini-Isıl direnci orta ve düşük seviyede olan kuru ve rutubetli mamuller*, Türk Standartları Enstitüsü.
- [106] **TS EN 12667** (2003). *Yapı malzemeleri ve mamullerinin ısı performans-Mahfazalı sıcak plaka ve ısı akış sayacı metotlarıyla ısıl direncin tayini-Yüksek ve orta ısıl dirençli mamuller*, Türk Standartları Enstitüsü.

- [107] **TS ISO 8301** *Isı yalıtımı-Kararlı halde ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini-Isı akış tayini için metotlar*, Türk Standartları Enstitüsü.
- [108] **Zegardlo B., Szelag M. ve Ogrodnik P.** (2018). *Concrete resistant to spalling made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes – The effect of moisture and porosity on destructive processes occurring in fire conditions*, Construction and Building Materials, 173, 58-68.
- [109] **Kalaycı Ş.** (2010). *SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri*, Ankara: Asil Yayın Dağıtım.
- [110] **Tang Z. ve Fishwick P.A.** (1993). Feedforward Neural Nets as Models for Time Series Forecasting, *ORSA Journal on Computing*, 5 (4), 374-385.
- [111] **Lippmann R.P.** (1987). An Introduction to Computing with Neural Nets, *IEEE ASSP Magazine*, April, 4-22.
- [112] **Wong F.S.** (1991). Time Series Forecasting Using Back Propagation Neural Networks, *Neurocomputing*, 2,147-159.
- [113] **Lewis C. D.** (1982). *Industrial and Business Forecasting Method*, London: Butterworth Scientific.
- [114] **Witt S.F. ve Witt C.A.** (1992). *Modeling and Forecasting Demand in Tourism*, Londra: Academic Press.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Nilgün KIZILKAYA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2002, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2011, İnönü Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden Mühendisliği Programı
- **Doktora** : 2021, İnönü Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2013-2018 İnönü Üniversitesinde Öğretim Görevlisi olarak çalıştı.
- 2018-Devam ediyor Malatya Turgut Özal Üniversitesi Öğretim Görevlisi olarak çalışıyor.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- Kızılkaya N., Özdemir, E. ve Eren Sarıcı, D. (2019). Madensel ve endüstriyel atıkların gaz beton üretiminde kullanılabilirliğine genel bir bakış, *Ispen Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi*, (pp.20-26). Malatya, Mayıs 3-4. (Bildiri Örneği)
- Kızılkaya N., Eren Sarıcı, D. (2020). Alüminyum tozu ve su oranının gaz betonun fizikomekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, *V. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi*, (pp.28-37). Malatya, Aralık 18-20. (Bildiri Örneği)